Maggio 2007

# POLITECNICO DI TORINO

# I Facoltà di Ingegneria

# Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica



TESI DI LAUREA

# MODELLISTICA E SIMULAZIONE DI SISTEMI CON GENERAZIONE DISTRIBUITA

Relatore:

Prof. GIANFRANCO CHICCO

Candidato:

ANTONINO PREVITI

Maggio 2007

# **INDICE**

INTRODUZIONE		pag.5
CAPITOLO 1 : La Programmazione DSL		
Paragrafo 1.1: Introduzione		.pag.6
Paragrafo 1.2: I frame e la loro definizione .		.pag.6
Paragrafo 1.3: I blocchi elementari e la loro definizione .		.pag.9
Paragrafo 1.4: La definizione del Composite Model		.pag.14
Paragrafo 1.5: La definizione del Common Model		. pag.17
CAPITOLO 2 : La struttura di un generatore eolico		
Paragrafo 2.1: Introduzione.		. pag.23
Paragrafo 2.2: La definizione del circuito unifilare		. pag.24
Paragrafo 2.3: Il modello matematico della turbina eolica.		. pag.25
Paragrafo 2.4: Approssimazione del modello di base.		. pag.26
Paragrafo 2.5: Lo schema a blocchi del modello di base.		. pag.27
Paragrafo 2.6: La rappresentazione grafica.		. pag.28
Paragrafo 2.7: Le simulazioni sul modello di base.		. pag.40
Paragrafo 2.8: Il modello di base con vento variabile.		. pag.45
Paragrafo 2.9: Il modello di base con il vento variabile ed		
il sistema di Pitch Control.		. pag.48
Paragrafo 2.10: Conclusioni		. pag.53
CAPITOLO 3 : L'influenza della generazione distribuita sulle re	eti	
in Bassa Tensione		
Paragrafo 3.1: La definizione della rete in bassa tensione.		. pag.54
Paragrafo 3.2: La progettazione della rete in bassa tensione.		. pag.61
Paragrafo 3.3: Il dimensionamento della rete in bassa tensione.		. pag.64
Paragrafo 3.4: I diagrammi di carico.		. pag.68
Paragrafo 3.5: L'impianto di generazione eolica.		. pag.87

Tesi di Laurea

Maggio 2007

Paragrafo 3.6: Il modello di base con il vento variabile ed		
il sistema di Pitch Control		. pag.87
Paragrafo 3.7: Ancora sui grafici di DIgSilent.		. pag.97
CAPITOLO 4 : Calcoli di corto circuito nelle reti ad Alta Tensior	ie	
Paragrafo 4.1: La definizione della rete ad Alta Tensione.		.pag.104
Paragrafo 4.2: Il calcolo del corto circuito con DIgSilent		.pag.106
Paragrafo 4.3: Lo studio statico del corto circuito nelle reti		
ad Alta Tensione.		.pag.113
Paragrafo 4.4: Lo studio dinamico del corto circuito nelle reti		
ad Alta Tensione.		.pag.114
CAPITOLO 5 : Studio della rete in Media Tensione		
Paragrafo 5.1: Definizione della rete in Medi Tensione		.pag.122
Paragrafo 5.2: Definizione del modello di una linea elettrica.		.pag.128
Paragrafo 5.3: Definizione del modello di un carico.		.pag.138

Paragrafo 5.4: Definizione del modello di un trasformatore.			.pag.142
Paragrafo 5.5: Le prove sulla rete in Media Tensione		•	pag.148

BIBLIOGRAFIA.									pag.153
---------------	--	--	--	--	--	--	--	--	---------

A mamma, papà, Graziella e Salvatore con sincero affetto.

## **Introduzione**

La necessità di ridurre l'inquinamento ambientale ha accresciuto l'interesse in tutto il mondo per l'introduzione nelle reti di distribuzione di piccoli e medi generatori che impiegano fonti primarie rinnovabili, anche in relazione al fatto che le nuove tecnologie offrono soluzioni più convenienti rispetto al passato. Tuttavia, sono oggetto di studio anche nuove tecnologie che utilizzano combustibili fossili tradizionali, come le celle a combustibile e le microturbine, poiché permettono un significativo abbattimento delle emissioni inquinanti nel funzionamento in cogenerazione.

La diffusione dei sistemi di piccola e media generazione, prevista per i prossimi anni, pone il problema della loro integrazione nelle reti di distribuzione in media e bassa tensione, sia per il mantenimento degli standard attuali di qualità dell'energia fornita, sia per lo sfruttamento dei possibili vantaggi che ne possono derivare. D'altra parte però, un'introduzione disordinata e non regolamentata potrebbe portare ad un peggioramento della qualità dell'energia elettrica; infatti, la potenza e l'ubicazione della generazione distribuita (dipendenti da diversi fattori come la disponibilità della fonte primaria, delle infrastrutture, della situazione urbanistica e normativa) alterano il funzionamento della rete, e spesso anche la qualità del servizio.

Lo scopo di questo lavoro è quello di indagare come gli impianti di generazione distribuita influiscano sui sistemi elettrici (con diversi livelli di tensione, diverse strutture e diverse disposizioni dei carichi) al variare della loro potenza e della loro ubicazione. In particolar modo, sono state investigate le influenze della generazione distribuita sui flussi di potenza attiva e reattiva, sui profili di tensione, sulle perdite di potenza ed infine sulle correnti di corto circuito. Tutto questo lavoro di simulazione è stato eseguito con l'ausilio del software DIgSILENT. Le logiche di implementazione dei modelli all'interno del software sono richiamate nel corso della presentazione delle applicazioni.

# **CAPITOLO 1**

## LA PROGRAMMAZIONE DSL

#### Paragrafo 1.1: Introduzione

La programmazione DSL è una programmazione per oggetti che permette di associare ogni possibile tipologia di schemi a blocchi a ciascuno degli elementi, attivo o passivo,disponibile con il software DIgSILENT.

Lo scopo di questo capitolo è di mostrare la procedura di costruzione di uno schema a blocchi e soprattutto mostrare come tale schema a blocchi viene legato ad un elemento presente nello schema unifilare preparato precedentemente.

**Paragrafo 1.2**: I frame e la loro definizione

Un generico schema a blocchi presenta una struttura annidata, nel senso che lo schema finale è un frame che può contenere al suo interno altri frame, i quali a loro volta possono contenere al loro interno altri frame e così via fino all'ultimo livello dove si troveranno invece dei semplici blocchi.

La differenza sostanziale tra il frame ed il blocco sta nel fatto che i primi possono contenere solo altri schemi a blocchi mentre i secondi potranno contenere solo la funzione di trasferimento che modellizza un determinato componente del circuito.

Nell'uso di DIgSILENT bisogna tenere presente che tutti gli oggetti che si intende utilizzare in un determinato progetto devono risiedere nella sezione "LIBRARY " dello stesso progetto.

Il primo passo da compiere, per la progettazione di uno schema a blocchi, è creare un percorso all'interno della libreria di progetto che individui una directory che andrà a contenere tutti quegli elementi che serviranno alla costituzione dello schema a blocchi nella sua forma finale.

Per creare questa directory si procede come nella Fig.1.

DIgSILE	<b>NT PowerFactory 13.1 - [</b> it Calculation Data Out	Graphic : Library' put Options Win	\ <b>blocchi</b> dow He	caso bas p	e+blade ang	le+venta	\blade ang	le\Graphic]	
<b>₩</b>	👸 🏟 , 🕂 🌵	🕴 🍂 🔁 🛛	nary :	g þ	🔹 🕀	6	III I	protezioni event	
2 🔎		te 🕫 🖬	🎭 60	<b>₩</b>	6 🗹 🛤	A 🛃	🛩 🖬		
	CO Test DSL i     CO Test DSL i     CO Underfreq     CO Underfreq     CO Underfreq     CO Underfreq     CO gene olice     CO gene olice     CO gene olice     CO inee prote     CO nino double     CO	Vent u_UnderVolt ampleAsm apleAsm apleAsm eolico 2 Pasini tte v-fed co case Case case case vento co case vento co case vento co co case vento co co co co co co co co co c	venti Grid Systs Stud	title     t	Nam blocchi caso bi completo+rela, frame caso ba Scale 1 1(1) 1(2) 1(3) IMPRS loc 1ph K K(1) K(2) K(3) K(4) K(5) K(5) K(7)	e pase pase+blade y se se+blade a	Type		
		Export Data	Grap Block Virtu	hic √Frame - al Instrum	Diagram Ient Panel				
			Fold	er					

Fig. 1: Dettaglio creazione directory

Comparirà a questo punto una finestra nei quali spazi vuoti bisognerà introdurre il nome della nuova directory e poi dare OK come in Figura2.

	NT PowerFactory 13.1 - [Graphic : Libr	ary\blocchi c	aso bas	e+blade angle+ven	to\blade angle\Grap	hic]	
🛄 File Edi	it Calculation Data Output Options	Window Help					
🚰 👾	🚳 🚳 🖪 🕆 👎 🖇 🙆	- 👷 🌄 j	a M	🔹 🕂 🗊 🙎	д 📻 🔄 protezio	nievent 💌 🚭	55
	🖳 Data Manager - \nino\nino eolico	Library :				_ 0	ыF
1월 👂		🚽 🧠 🚓	<b>₩</b>	. 271 886 🗛 🖃			
			100 040				_
) ) blátě ánýle	E- C UnderFrequ UnderVolt			Name	Type		
	⊕ @∃ WIND_ExampleAsm		> 000	blocchi caso base			
	I ← C∃ eolico doubly fed		660	blocchi caso base+blac	le		
	tt- va⊐ g.eoio tt- va⊐ gen eolico		000	completo+relay			- 1
			000	frame caso base			- 1
	🖻 🐨 lezione 1 & 2 Pasini			Scale	a		- 1
	ter ve⊒ linee protette		•	1			
	E 😨 nino eolico		•	1(1)			
	🕀 🐝 caso base		4	1(2)			
	H= 102 Study Lase	ale + venti	1	1(3)			- 1
	caso base + vento			IMPRS			-
	🖭 🖼 protezioni event		1 1	K			-
	Et <b>130</b> Library		•	KM			
			•	К(2)			
	🗈 💿 prova carico	Folder - Libra	ary\Fold	ler1		×	
	+ GB prova protezioni	Name		Folder1		пк	- 1
	Examples E Course Bin	Oumor					
	🕀 🧰 Settings	Constant		J		Cancel	E
		Modified					-
	•	Accessed				Descript. >>	
	Ln 1  39 object(s) of 39  1	– Attributes –		- Folder	Tupe	Contents	111
		System	(DIaSILE	NT) C Cor	mon		
				• Libr	rary		
					•		
L		Filter	×				

Fig. 2: Dettaglio scheda directory

A questo punto comincia la vera progettazione dello schema a blocchi, partendo dallo schema finale e risalendo sino ai blocchi elementari.

Cominciamo con il creare il frame più esterno che conterrà lo schema a blocchi finale (Fig.3).

DIgSILE	NT PowerFactory 13.1 - [Grap lit Calculation Data Output	hic : Library\blocchi caso ba Options Window Help	se+blade angle+ve	ento\blade angle\Grap	hic]
	<u>@ @ R P P P P</u>	M 🖸 🗟 🐷 👌 M		🕵 🎟 🖂 protezion	ni event 💽 🔄 🧏
ê 🔎	Data Manager - \nino\nir	no eolico\Library\Folder : a 🛍 🖬 🏶 😚 😼 🗧	a 📶 🛤 A [	2 🛩 🖬	
bliğisê aingile		o sini	Name	Туре	×
	Caso base +     Caso base	· blade angle + venti · vento vent			
	€ 000 Edit € 000 Find € 000 Shar € 000 Shar	ing			
	⊕ (100) Cut 	y e			
		ame Study Case			
	Ln 1 0 object(s) of 0	0 objec Graphic 0 objec Block/Frame - Virtual Instru	Diagram Ient Panel		
		Folder			

Fig. 3: Dettaglio creazione frame

Comparirà una finestra (Fig.4) che andrà riempita con il nome che si vuole dare all'oggetto che si sta creando, dopo di che si potrà dare OK.

DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : Library\blocchi caso base+blade angle+vento\blade angle\Graphi	c]
File Edit Calculation Data Output Options Window Help	
🗟 🐨 🧕 🤹 😨 🕂 🕂 💈 🖉 😨 🐼 🖉 💷 🗇 🗊 🖉 protezioni	event 🗹 🖄 🧏 📩
Data Manager - \nino\nino eolico\Library\Folder :	_ <u> </u>
🗖 🖆 🔁 🖹 🗙 🌡 🛍 🛍 🔛 🍪 🚳 🐼 🕍 🚣 🖆 🛤 A 🔡 📽 🖬	
B Call geolo	
er val gen. eo generati ⊕ © generati	×
E-C3 lezione Name noname1	ОК
	Canad
Caution: Changing level of already used models requires adaptation of all dependent model	si <u>cancer</u>
Stu Level 3: Level 2 + lim()-function precise in time	
	Contents
	Equations
E COD Matlab	Macro Equat.
Upper Limitation	Check
COD     Compared to the c	
Limiting Input Signals	Lineck Inc.
Lower Limitation	Pack
Limiting Parameter	Pack-Macro
E E Limiting Input Signals	
4	Encrypt
Ln 1 0 object(s)	
Output Signals	
Input Signals	
State Variables	
Parameter	
Internal Variables	

Fig. 4: Dettaglio scheda frame

Il programma creerà un nuovo foglio di lavoro che presenterà una cornice con, in alto a sinistra, il nome che gli si è scelto.

Su tale foglio di lavoro si dovrà disegnare lo schema a blocchi che si intende realizzare attingendo, per i vari elementi, dalla colonna presente nella parte destra dello schermo.

Disegnato l'intero schema, si dovrà procedere con la costruzione dei singoli blocchi costituenti.

Nella libreria del progetto si creerà un nuovo blocco

 $\mathsf{DM} \rightarrow \mathsf{Library} \rightarrow \mathsf{Path} \text{ folder} \rightarrow \mathsf{click} \text{ tasto destro} \rightarrow \mathsf{new}... \rightarrow \mathsf{Block}/\mathsf{Frame} \text{ Diagram}$ 

Comparirà come di consueto una finestra di dialogo nella quale inserire il nome del blocco in questione, dopo di che si può dare l'OK.

Sul nuovo foglio di lavoro si procederà col disegnare uno schema a blocchi costituito da altri frame oppure, nel caso si sia giunti al livello più basso della nostra schematizzazione, da blocchi elementari che ricordiamo portano al loro interno le funzioni di trasferimento.

Paragrafo 1.3: I blocchi elementari e la loro definizione

Riportati i singoli blocchi sul foglio di lavoro, si procederà con la loro definizione e ciò significa rappresentare in ognuno di essi una funzione di trasferimento.

Tutte le forme possibili per una funzione di trasferimento sono contenute in una directory della libreria generale di DIgSILENT, chiamata "Macros", a cui si può accedere seguendo il percorso di Fig.5.



Fig. 5: Dettaglio directory Macros

Da questa lista si possono scegliere, una ad una, tutte le funzioni di trasferimento che servono al progetto, copiandole nella libreria di progetto.

Il prossimo passo che si dovrà eseguire sarà quello di assegnare ognuna delle funzioni di trasferimento ad ognuno dei blocchi; per questo si darà un doppio click sul blocco, dopo di che comparirà una finestra di dialogo come in Fig.6. Nella quale finestra viene data la possibilità di scegliere un tipo, per il blocco, selezionando sul pulsante **v**.

DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Grap	phic:Library\Folder\prova1\Graphic] Options Window Help
🗟 🔛 💩 🚳 🖪 ው ው 🕴	兆 😰 👷 🛃 📳 🐡 🖑 🗊 🕱 🖽 🖻 protezioni event
🐴 🔎 🎾 🗌 100% 🔽 🎒 📾	1 21 🖹 📽 ች Σ 🗠 🐺 🛃 🗙 🐇 🛍 🛍 İ 🛷 🖽
ріфиці:	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	Rinck Deference - Library/Ender/ prova1/Block Deference Bil/Def
	Name Block Reference OK
	Sequence 0. Type  Type
	Limiting Parameter
	Upper Limitation
	Variables-
I I I I I I Caso base ∕ gen eolico co	State Variables

Fig. 6: Dettaglio scheda introduttiva del blocco

Verrà fuori un menù attivo dal quale bisognerà selezionare la voce "Select" (Fig.7).

DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graph	h <mark>ic:Library\Folder\prova1\Graphic]</mark> Options Window Help	
電 🐼 💩 🚳 🗷 中中 🕴	M 🔁 👷 🛃 🛯 🔹 🕫 🖬 🗐	protezioni event
🏝 🔎 🎾 🗌 100% 💽 🎒 🖽	🖄 🗃 🍃 ች Σ 🗠 🖼 📑 🐔 🐁	1 🗝 📼
provat:	····	
Block	k Reference - Library\Folder\prova1\Block Reference.BlkRef	
Seq.	uence 0. e <b>▼ →</b>	Cancel
Title	e Select Reset miting Parameter	Update
	ariables	
Parenter Press Dase & generative Press	arameter ata construction and the second sec	
Int	temal Variables	

Fig. 7: Dettaglio selezione del tipo

Apparirà dunque una finestra di dialogo che invita alla scelta di una tra le funzioni di trasferimento presenti nella libreria di progetto (in tale contesto le funzioni di trasferimento vengono indicate con il nome "block definition") come in Fig.8.

DIgSILEN	T PowerFactory 13.1 - [ Calculation Data Out	[Graphic : Library put Options Wir	\ <b>Folder\prova1\Gra</b> p idow Help	hic]			
	â 🎕 🖪 P P	1 M 🕑	3 🔓 🖉 🖬 🕴	» 🕂 🖸 💆	DE PO	otezioni event	🖸 🖾 🛃
ê 🔎	30 🗌 100% 🔽 🖨	🗁 🖆 🎦 🖬	🛎 🏳 Σ 🕇 📽	🖬 🛃 🗙 🐰	<b>B B</b> 1	[ 🚽 📼	
provat:							
		Block Reference	e - Library\Folder\pro	va1\Block Refere	ence.BikRef	×	
		Name Sequence	Block Reference			OK	
Pleas	Select 'Block Definitio	n' - \nino\nino eo	olico\Library :			Canad	×
			66 🐄 🍰 🖆	M 📽 🖬			ОК
	E = caso base	ase + t iso+bla	1(3)	rype			Cancel
	i⊞- <b>≊a</b> Study Case	comp 🖂	IMPRS loc 1ph				Filter
	caso base     caso base     caso base	+ blade + vent	K				
	E 1111 Library	iettings	K(2) K(3)				
			K(4) K(5)				_
	Examples      Examples		K(6) K(7)				E
		▼ ●	K(8) K(9)			v	
					•		
	n 13   125 object(s) of 39	1 object(s)	selected				11.

Fig. 8: Dettaglio scelta funzione di trasferimento

La scelta della funzione di trasferimento dovrà essere effettuata dalla colonna "Name" con un click sul tasto . Eseguita la scelta si potrà dare l'Ok ad entrambe le finestre ed a questo punto l'associazione tra blocco e funzione di trasferimento è stata completata. Questa procedura dovrà essere eseguita per ognuno dei blocchi presenti nello schema a blocchi.

Il successivo passo sarà quello di definire le grandezze in ingresso ed in uscita dal blocco, i parametri che entrano in gioco nel modello, le variabili interne e quelle di stato. Queste definizioni verranno effettuate selezionando con un doppio click il blocco ed avendo così accesso alla scheda dello stesso (Fig.9).

DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : Library\Folder\prova1\Graphic]
🗔 File Edit Calculation Data Output Options Window Help
🔄 😼 🧔 🚓 🛛 🕃 🕂 🖡 💈 🙏 😰 👷 😓 🖉 📳 🔹 🕀 🗊 🖉 🖬 🖃 protezioni event
👻 🔎 🎾 🗋 100% 🔽 👙 🖽 🖄 🎽 🎽 🗲 🖄 💭 💭 🖼 👹 🚺 🗶 🛤 💼 İ 🖊 🛤
provait;
Block Reference - Library\Folder\prova1\Block Reference.BlkRef *
Name Block Reference OK
Cancel
Type
Limiting Parameter
Upper Limitation
Lower Limitation
Variables
Parameter K
Caso base gen eolic State Variables
Internal Variables

Fig. 9: Dettaglio descrizione della scheda del blocco

Successivamente, selezionando il pulsante 🗈 comparirà una finestra di dialogo nella quale bisognerà riempire i vari campi con le grandezze di cui sopra (Fig.10). In tale fase, bisogna fare attenzione perché ci deve essere assoluta congruenza tra il nome che si sceglie per le grandezze in ingresso od in uscita dal blocco ed il nome che viene inserito nei rispettivi campi degli altri blocchi, pena il non funzionamento del modello intero.

DIgSILENT PowerFactory 13. Tile Edit Calculation Data	1 - [Graphic : Library/blocchi caso base+blade angle+vento\blade angle\Graphic] Output Options Window Help	
🕾 🐱 🚳 🚳 🗜	👎 💈 🏂 🔛 🛃 📳 🔹 🕀 🖬 🔹 protezioni event	I 🖼 📩 🖄
P 2 1002      Internal Variables	Block Definition - Library\K(6).BlkDef *         Name         Tile         Caution: Changing level of already used models requires adaptation of all dependent models !         Level       Level 0: Model created in Build < 57         Automatic Calculation of Initial Conditions         Classification         ✓ Linear         Macro         Matlab         Upper Limitation         Limiting Parameter         Limiting Input Signals         Variables         Output Signals         Input Signals         Parameter         Internal Variables	Contents Contents Equations Macro Equat Check Check Inc. Pack:>Macro Encrypt

Fig. 10: Dettaglio definizione blocco

L'introduzione del modello matematico viene invece eseguita nella pagina successiva, alla quale si accederà selezionando il pulsante ▶ presente nella precedente finestra in alto a destra. Si avrà accesso ad una seconda pagina come si può vedere in Fig.11.



Fig.11: Dettaglio introduzione modello matematico

In questa nuova finestra sarà visualizzata la relazione tra l'uscita (indicata con yo) del blocco ed il suo ingresso (indicato con yi) attraverso la funzione di trasferimento che si era scelta per il blocco, con l'unica differenza che la funzione di trasferimento era stata scelta come funzione nel dominio di Laplace mentre adesso compare come funzione nel dominio del tempo.

E' consigliabile sostituire i nomi assegnati dal software alle variabili di ingresso ed uscita con i propri, al fine di evitare errori e per una più immediata lettura e comprensione del modello intero.

Definito così il modello matematico completo, bisognerà definire le condizioni iniziali per ognuna delle variabili che compaiono nel modello.

Questa operazione può essere eseguita nella stessa pagina che contiene il modello usando l'istruzione

#### inc(nome\_variabile)=valore\_variabile

Quest'ultima operazione risulterà essere necessaria perché quando si effettuerà una simulazione nel tempo (RMS Simulation) il software chiederà di lanciare prima il calcolo delle condizioni iniziali ed è in tale frangente che lo stesso software attingerà alle condizioni iniziali dichiarate nel modello di cui sopra.

Sarà allo stesso tempo importante che le condizioni iniziali siano calcolate in maniera esatta, al fine di evitare delle possibili incongruenze negli andamenti che si intende visualizzare.

Fatto ciò si possono chiudere tutte le finestre perché il blocco è stato definito in tutte le sue parti.

## Paragrafo 1.4: La definizione del Composite Model

Il Composite Model è il mezzo di cui ci si serve per collegare effettivamente il modello matematico che si introduce con gli schemi a blocchi al componente elettrico presente nello schema unifilare.

Il Composite Model deve essere creato nella griglia in studio, in quanto è a tutti gli effetti un componente della rete, anche se non compare fisicamente nello schema unifilare. Per creare un Composite Model bisogna innanzitutto selezionare con un singolo click la griglia oggetto di studio (Fig.12).



Fig. 12: Dettaglio destinazione Composite Model

A questo punto bisognerà creare l'oggetto Composite Model selezionando il tasto "new object" i posto in alto a destra nella barra degli strumenti del "Data Manager". Comparirà una finestra di dialogo come in Fig.13 nella quale sono presenti una lista di oggetti e dalla quale bisognerà scegliere la voce "Composite Model".

DI	gSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : Grid\Grid]	
Fi	le Edit Calculation Data Output Options Window Help	-
뿉	🔄 Data Manager - \nino\UnderFrequ_UnderVolt\Grid :	
<u>م</u>	È È À X ½ è C C C 40 40 ½ 40 ½ 40 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	,
_	Administrator Administrator Type	
	Element Selection - Settings\Default\Element Selection.IntNewobi*	
	E G Breaker OK	
	B C Terminals, Station	
	🖻 🐨 Generati 🔿 Branch Net Elements Cancel	
	Case IEEE 13     C Bus Net Elements	
	Carl LOAD     C Types for Net Elements	
	日 (2月 NUDI_1U	
	E G Durgi-S C Concession Made Diversion de Concession de C	
	B- C Lommon Model	
	🖻 📼 PowerSt C Block Diagram	
	Rete AT     O DPL Command and more	
	Gan Rete bt     C Others	
	B Ca RevPow	
	E Correction Contraction	
	Element Composite Model (ElmComp)	
	🕀 🧒 Stuc	
	DOD Library	
	⊕      p     20 Changed Settings	ㅋ--
		- INCE
	Ln 1 1 object(s) of 1 1 object(s) selected Drag & Drop	

Fig. 13: Dettaglio selezione elemento Composite Model

Dando l' OK comparirà una nuova finestra Fig.14. Il primo passo sarà quello di dare un nome al Composite Model. Il successivo passo sarà quello di scegliere il frame a cui il Composite Model dovrà puntare, e ciò significa specificare quale schema a blocchi si vuole realizzare durante una simulazione.

DI Fi	<b>95ILENT Powerf</b> le Edit Calculat <b>Data Mana</b>	actory tion Dat	13.1 - [Graphic : Grid\Grid] :a Output Options Windov ino\UnderFrequ UnderVoll	w Help		
47 47 1		ger - \ni Basic Da Name Frame Out Slot De	no\UnderFrequ_UnderVolt	A Grid : • Model.ElmComp Net Elements Elm*,Sta*,JntRef	Cancel	
	Co     Co	bject(s) c	Slot. Update	Step Response Test		

Fig. 14: Dettaglio scheda descrittiva Composite Model

Selezionando il pulsante spunterà un menù attivo con due voci, dal quale bisognerà scegliere la prima semplicemente trascinandoci sopra il cursore ed eseguendo un singolo click (Fig.15).



Fig. 15: Dettaglio selezione frame di riferimento

Verrà fuori una finestra come in Fig.16 che inviterà alla scelta di un frame.



Fig. 16: Dettaglio elenco frame

La scelta del frame deve avvenire dalla colonna "Name", selezionando con un click il simbolo

Si potrà notare adesso che nella parte sottostante della finestra del Composite Model (che adesso sarà in primo piano) è comparso l'elenco di tutti i blocchi (slots) presenti nel frame appena scelto, come si può vedere dalla Fig.17.



Fig. 17: Dettaglio elenco slot

A questo punto bisognerà associare ad ognuno di questi slot le funzioni di trasferimento dei singoli blocchi. Questa operazione verrà eseguita facendo puntare i singoli slot ad un nuovo elemento di DIgSilent, che si chiama Common Model e che verrà trattato nel prossimo paragrafo.

## Paragrafo 1.5: La definizione del Common Model

Nelle funzioni di trasferimento che sono state introdotte nei vari blocchi saranno probabilmente presenti costanti di tempo e parametri che sono stati introdotti semplicemente con il loro nome. Il Common Model è lo strumento che permette di associare ad ognuna di queste grandezze un valore numerico preciso.

E' meglio creare i vari Common Model in una sottodirectory del Composite Model a cui si vuole siano associati, per evitare confusione nel loro futuro utilizzo.

Per creare un Common Model bisogna prima selezionare con un singolo click il Composite Model presente nel Data Manager, così da specificare la cartella in cui creare i Common Models, successivamente si andrà a selezionare il pulsante "insert new object" avente il simbolo 🗈 che si trova nella barra degli strumenti dello stesso Data Manager.

Verrà fuori una finestra di dialogo contenente una lista di oggetti, dalla quale bisognerà scegliere la voce Common Model come in Fig.18.



Fig. 18: Dettaglio scelta elemento Common Model

Dopo aver dato l'OK comparirà in primo piano una nuova finestra di dialogo che invita alla scelta del blocco a cui si desidera che il Common Model punti (Fig.19). Si ricorda in questo frangente che tutti i blocchi sono presenti in un percorso all'interno della libreria di progetto ed è da qui che devono essere scelti, pena il messaggio di errore. Tale scelta viene eseguita selezionando il tasto



Fig. 19: Dettaglio scelta blocco di riferimento

Una volta operata la scelta si potrà dare l'OK ed avere così l'accesso alla scheda del Common Model (Fig.20).

File Edit Calculation Data Output Options Window Help	-
Data Manager - \nino WIND_ExampleAsn\WindGen\Plant WT:	

Fig.20: Dettaglio elenco di definizione parametri interni

Come si potrà notare, alla voce "Model Definition" compare il percorso che identifica il blocco a cui punta lo stesso Common Model, mentre le due colonne sottostanti elencano i nomi di tutti i parametri presenti nel blocco, quella di destra, ed i loro valori numerici quella di sinistra.

Nell'eventualità si volesse cambiare uno o più valori dei parametri, basterà selezionare con un singolo click la casella corrispondente al parametro nella colonna " parameter " ed inserire quindi il nuovo valore.

Selezionando OK la scheda del Common Model verrà chiusa ed il simbolo dello stesso comparirà nella cartella del Composite Model selezionato inizialmente come in Fig.21.



Fig. 21: Dettaglio destinazione Common Model

A questo punto il Common Model è stato definito in ogni sua parte, per cui si può andare oltre nella definizione del Composite Model che si era lasciata alla fase di riempimento degli slot.

Ritornando al Data Manager, si selezioni il Composite Model con un singolo click, poi con un click del tasto destro verrà fuori un menù attivo nel quale si dovrà selezionare la prima voce " Edit "; si aprirà quindi l'editor dello stesso Composite Model, come in Fig.22.



Fig. 22: Dettaglio associazioni slot-componenti elettrici

Andando direttamente nella sezione degli slot, si dovrà selezionare con un singolo click una delle caselle vuote nella colonna "Net Elements " e successivamente con un click del tasto destro comparirà un menù attivo come in Fig.23.



Fig. 23: Dettaglio associazione slot – Common Model

Selezionando la voce "Select Element/Type "verrà fuori una finestra di dialogo, che inviterà alla scelta del Common Model a cui dovrà puntare lo slot (Fig.24).



Fig.24: Dettaglio scelta del Common Model

La scelta dovrà essere fatta selezionando il tasto **F** presente nella parte destra della finestra, con un singolo click. Successivamente selezionando Ok la finestra si chiuderà ritornando così all' Editor del Composite Model. Si potrà notare adesso che la casella non è più vuota a verifica del fatto che l'assegnazione è andata a buon fine.

Questa procedura dovrà essere eseguita per tutti gli slot vuoti che compaiono nell'Editor.

In questa fase, si può incorrere nell'errore di associare ad un determinato slot un Common Model sbagliato e purtuttavia non avere nessun messaggio di errore da parte del software; per evitare ciò è consigliabile denominare ogni singolo oggetto che si crea in maniera inequivocabile. Ad esempio, se uno slot dovrà contenere la funzione di trasferimento di una turbina lo si potrà denominare "Turbina", mentre il Common Model che punterà al blocco della turbina potrà essere denominato Common Model Turbina. Questa operazione, che a prima vista potrebbe sembrare macchinosa, si rivelerà utile in caso di un funzionamento anomalo oppure di un non funzionamento del modello durante una simulazione. Infatti, possibili errori nell' assegnazione degli oggetti salteranno subito fuori da una ispezione visiva, evitando così di dover spulciare tutti gli oggetti creati alla ricerca del possibile errore.

## CAPITOLO 2

#### STRUTTURA DI UN GENERATORE EOLICO

#### Paragrafo 2.1: Introduzione

In generale un generatore eolico comprende due parti principali, una turbina eolica ed un generatore asincrono.

L'idea di fondo è di realizzare un modello della turbina eolica e di usare invece un modello di generatore asincrono che dovrà solo essere dimensionato nelle sue parti essenziali.

Le caratteristiche meccaniche della turbina eolica sono state prelevate dal sito di un produttore europeo, VESTAS, riferendosi al modello V80-2MW avente le seguenti caratteristiche:

- 1) diametro turbina = 80 m;
- 2) area spazzata dalle pale = 5024  $m^2$ ;
- 3) velocità = 16.7 rpm;
- 4) intervallo di funzionamento =  $(9 \div 19)$  rpm;
- 5) numero pale = 3;
- 6) velocità nominale vento = 15  $\frac{m}{s}$  (corrispondente ai 2MW);
- 7) intervallo di funzionamento =  $(4 \div 25) \frac{m}{s}$ ;
- 8) potenza nominale in uscita =2 MW;
- 9) tensione nominale = 690 V;
- 10) frequenza = 50 Hz.

Per quanto riguarda invece il generatore asincrono, si è cercato nella libreria generale del software DIgSILENT ma non se ne è trovati della taglia cercata. Per tale motivo si è sfruttata la possibilità (del software) di definire un generatore asincrono di tipo generico, semplicemente introducendo le caratteristiche di potenza richieste.

Pnom = 2 MW singola gabbia di scoiattolo

Paragrafo 2.2: La definizione del circuito unifilare

Per eseguire tutte le varie prove sul modello del generatore eolico bisognerà metterlo in condizioni di poter funzionare e ciò significa collegarlo ad una rete. La rete, proprio perchè si tratta di prove,

è costituita da un solo nodo, al quale vengono allacciati tre elementi:

- 1) una rete di potenza prevalente con funzione di slack;
- 2) il generatore eolico;
- 3) un carico con potenza attiva 4 MW e potenza reattiva 2 Mvar.

Lo schema così costituito dovrà essere validato per verificare la mancanza di errori nella definizione degli elementi. Si lancia così una simulazione di load-flow che risulterà convergente a prova della bontà dello schema. In Fig.1 è riportato lo schema unifilare con tutti i flussi di potenza sia attiva che reattiva per tutti gli elementi.



Fig. 25: Schema unifliare

Paragrafo 2.3: Il modello matematico della turbina eolica

La funzione della turbina eolica è quella di trasformare l'energia cinetica del tubo di flusso di aria in movimento, che investe le pale, in energia meccanica.

Tale trasformazione non sarà mai totale perché ciò imporrebbe di avere fluido in movimento nella parte anteriore della turbina e fluido completamente fermo nella parte posteriore e ciò è impossibile.

La potenza totale estraibile dal vento e disponibile all'albero sarà la seguente:

$$P_{turbina} = \frac{\rho}{2} \cdot c_p(\lambda, \theta) \cdot A_R \cdot v_w^3$$

dove :  $\rho$  è la densità dell'aria pari a  $1.23 kg/m^3$  s.l.m.;

- $c_p$  è il coefficiente di prestazione adimensionale;
- $A_R$  è l'area spazzata dalle pale della turbina espressa in  $m^2$ ;
- $v_w$  è la velocità del vento, espressa in m/s.

Tra i vari termini, il  $c_p$  è quello che ricopre la maggiore importanza importanza, per il semplice fatto che per ogni fissata velocità del vento si può intervenire su di esso per fargli assumere il massimo valore possibile in quelle determinate condizioni.

Esistono diversi modi per rappresentare in forma analitica tale coefficiente  $c_p$  e questo perché non essendo perfettamente descrivibili tutti i fenomeni che lo influenzano ci si può affidare ad approssimazioni. Quella che è stata presa in considerazione in questa sede è la seguente ([S,P,K-2001])

$$c_p = 0.22 \cdot \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4 \cdot \theta - 5\right) \cdot e^{\left(\frac{-12.5}{\lambda_i}\right)}$$

dove

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1};$$
$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v_W};$$

Tesi di Laurea

$$\theta = \arctan\left(\frac{v_w}{\varpi \cdot R}\right) - \alpha$$
 ([J-1976]).

Il coefficiente  $\lambda$  è chiamato "tip speed ratio" ed è il rapporto tra la velocità all'estremità della pala e la velocità del vento. L'angolo  $\theta$  è invece chiamato "blade angle" oppure "pitch angle" ed è l'angolo con cui la pala incide il vento.

## Paragrafo 2.4: Approssimazioni del modello base

Per la descrizione del modello del generatore eolico, si comincerà da un modello estremamente semplificato per arrivare, alla fine, ad un modello molto più vicino alla realtà.

Le approssimazioni contenute nel modello base sono una velocità del vento ed un angolo di pitch (detto anche blade angle) costanti. In tale modo, il modello matematico da implementare con il software sarà il seguente

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{0.16 + \frac{40 \cdot \omega}{v_{wind}}} - 0.003889;$$
$$c_p = \left(\frac{25.52}{\lambda_i} - 1.276\right) \cdot \exp\left(-\frac{12.5}{\lambda_i}\right);$$

$$P_t = 3089.76 \cdot c_p \cdot (v_{wind})^3$$
 [W];

Si può notare come la velocità alla punta della pala sia ottenuta moltiplicando la velocità dell'albero espressa in rad/s per il raggio della pala (40 m) della turbina. Per il vento si è scelto un valore di velocità pari a 15 m/s mentre per l'angolo  $\theta$  si è scelto un valore pari a 2 deg.

Tesi di Laurea

Paragrafo 2.5: Lo schema a blocchi del modello di base

Lo schema a blocchi del caso base rappresentato in Fig.2.



Fig. 26: Schema a blocchi del generatore eolico

La logica che sta dietro a questo schema è molto semplice, in quanto viene prelevata la velocità di rotazione dell'albero che costituirà l'ingresso del primo blocco, il quale calcolerà il coefficiente  $\lambda$ . L'uscita del primo blocco sarà l'ingresso del secondo blocco che lo userà per il calcolo del coefficiente  $1/\lambda_i$ , che permetterà al terzo blocco di calcolare il coefficiente  $c_p$ .

Il cerchio si chiuderà con il calcolo della potenza meccanica  $P_t$  da parte del quarto blocco. Questo valore di potenza è quello che metterà in moto il generatore asincrono. Bisogna precisare che deve essere prestata attenzione alle u.d.m. di quelle grandezze che devono comandare i componenti elettrici. Un errore in tal senso può causare o un funzionamento anomalo oppure un funzionamento del componente secondo i parametri inseriti nella sua scheda di definizione e quindi come se lo schema a blocchi non esistesse.

## Paragrafo2.6: La rappresentazione grafica

Vediamo prima però come creare una pagina grafica dove visionare i vari andamenti. Nella seconda riga della barra degli strumenti si troverà un pulsante di "Insert New Graphic" con il simbolo 🗐, selezionando il quale verrà fuori una finestra di dialogo come nella Fig.3



Fig. 27: Dettaglio selezione strumenti grafici

Nella nuova finestra comparirà una lista dalla quale bisognerà scegliere la voce "Virtual Instrument Panel" e dopo di che si potrà dare il comando di "Execute".

Ricordiamo che DIgSilent divide l'intera schermata in due parti che chiama rispettivamente Graphic Window ed Output Window la prima corrispondente alla parte superiore dello schermo e la seconda corrispondente alla parte inferiore. A questo punto la finestra scomparirà e sul piano di lavoro sarà comparso un nuovo foglio di lavoro in cui dovranno essere posizionati i grafici.

Adesso si può scegliere quanti grafici posizionare in tale foglio selezionando il pulsante che è disponibile solo per le pagine grafiche, che darà l'accesso ad una finestra come in Fig.4.

In tale finestra, alla voce "Object" sono disponibili tutta una serie di tipi di grafici, ma per gli scopi di questo capitolo si terrà conto solo della prima "Subplot".

DIGSTI ENT Po	werFactory 13.1 - [	Granhic : nrot	ezioni event\Gi	ranhics Boar	·d∖orafico(1)	1
File Edit Ca	alculation Data Out	put Options '	Window Help		-,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	_
🛱 🔛 🙋	🚳 🖪 ቶ ቶ	🕴 🛝 😰	5.0	¥ .	0 6	I III
P % 🗆 🗉	00% 🔽 🎒 🖽	21 🖹 🗲	🖻 🗒 🛄 🗖	<b>-</b> 🐺 🔀	M 😞 🗸	05 H-H 3
	Append ¥Is				1	×
	Object	Subplot (Visf	Plot)	<b>-</b>	OK	]
	Number of VI(s)	1			Cancel	

Fig. 28: Dettaglio selezione del tipo di grafico

Alla voce "Number VI" bisognerà introdurre il numero di grafici che si vuole siano rappresentati assieme sullo stesso foglio.

Se si sceglie per esempio di visualizzare quattro grafici, di otterrà un risultato come nella Fig.5.

DIgSILENT PowerFa	actory 13.1 - [Graphic : prote	zioni event\Graphics Board	d\grafico(1)]		
] File Edit Calculati	ion Data Output Options V	Vindow Help			
a 💀 🧔 🚟	🗟 🕆 👎 🕴 🔟 🔯	易品。@ 神 助	🕘 🗊 🕱 🕅 🗊 🕐	ezioni event 💌	1 1x 2 1
		a 🗈 📼 💳 🔽	ND _   • • T• 14	15 mm + Default	
			Mu ∽ ↔ ↔ ±• ≍~ ×		
1.00		т	·		7
0.80		+			
0.60					
0.40					
0.20		+			
-0.0000	48.000	96,000	1++.00	192.00	[1] 240.00
1.00					7
0.80		+			
0.60		+	·		
0.40		+	·i	i	i
0.20		+			
-0.0000	+8.000	96,000	1++.00	192.00	[1] 2+0.00
100					7
0.80		+	+		!
0.60					
0.40		+	·	i	
0.20		+			
-0.0000	000.8+	96.000	1++.00	192.00	[1] 240.00
100 E		т			7
0.80		+			
0.60			·		
0.40		†			
0.20		+			
-0.0000	48.000	96,000	144.00	192.00	[1] 240.00
				gratic	o(1) Dale: 3/21/2007
Caso bas	e / gen eolico completo 2 /a	nem / turbina3 / grafico / Cp	2 / misura energia / blade and	le \ grafico(1)/	

Fig.29: Dettaglio pagina grafica

Per ottenere una diversa disposizione dei grafici, si può selezionare il pulsante Me che permetterà una disposizione come in Fig.6.



Fig. 30: Dettaglio pagina grafica con diversa disposizione

Per ognuno dei quattro grafici bisognerà definire la grandezza che si vuole rappresentare; e questo può essere fatto eseguendo i due punti descritti a seguire:

Punto 1) Il primo punto richiede di inserire in un elenco tutte le grandezze di interesse e questo può essere fatto nella maniera seguente.

Si selezioni il pulsante 🛋, che si trova nella prima riga della barra degli strumenti, per accedere ad una nuova finestra come si vede in Fig.7.

DIgS	ILENT Pow	erFactory 13.1 - [Grap	ohic : protezioni (	event\Graph	ics Board\	grafico(1)]					
File	Edit Calo	ulation Data Output	Options Window	Help							
<b>*</b>	š 🙆 ć	ն 🖳 🕂 🕂 🕴	M 😰 🐰	🗞 🖉 M	🛛 🔹 🖉	0 🗊 🖸	TH P	protezioni event		•	<u>r</u> ,
23	Results -	\nino\nino eolico\nro	va 🗠 🗗 🖪 tezioni event\Al	calculation	<b>किन्द्र</b> लि	m II	A P X P	Tx1 1.5	-		X
POPOLO POPOLO	ites dies	(inito (inito conco (pro			<u> </u>						- H
1.0	18 >	< 🎖 🖻 🖷 🖬	🏶 60° 🕬	la 🗹   🏘	🛩 日					пк	וו
		Name	Object								- []
0.9	b. dec									Cancel	
	005	Variable Set	generatore asinch Common Model								-  i
	995	Variable Set(17)	Bete Esterna						-11		1
0.9	825	Variable Set(17)	Common Model tu						-11		+
									- 11		i i
0.0											Ĺ
0.2											÷.
											1
0.0									-		2.00
				4							
1.0	Ln 1	4 object(s) of 4	1 object(s) se	elected							-
	ŀ	i i	i	i	il	F		ii		i	

Fig.31: Dettaglio elenco componenti con grandezze visualizzabili

Per poter rappresentare una generica grandezza, bisogna sapere a quale elemento della rete essa appartenga, e quindi bisognerà introdurre tale elemento nella colonna "Object", selezionando il tasto 🖻 con un singolo click e così facendo si aprirà una nuova finestra, come in Fig.8.



Fig.32 . Dettaglio scheda selezione grandezze da visualizzare

Alla voce "Object", selezionando il pulsante verrà fuori un menù attivo dal quale bisognerà scegliere la voce "Select". Questa selezione permetterà di determinare quale componente della "Grid", e non importa se è oppure no un componente elettrico, si vuole introdurre nella lista.

Avendo dunque selezionato la voce Select, verrà fuori una finestra (Fig.9) che invita alla scelta del componente desiderato. Si ricorda che la scelta deve essere effettuata nella finestra di destra selezionando uno dei pulsanti recanti il simbolo.

Bas	EMT-Simulation <sup>C</sup> Please Select Obje	Harmonics	:o\caso base	Optimization	Reliability e angle\caso+blad	Descripti e angle+vento\cor	on   npleto+r	elay: X
	Image: Second secon	Nodel     Image       Index entrol     Image	Image: Control     Image: Control       Image: Contro     Image: Contro<	Name Name o base mp Mod Relay nposite Model 2 eretatore asincrono mmon Model anno mmon Model anno mmon Model ba nmon Model ba nmon Model ba nmon Model ba o ba e Estema ted	Caso-blade angle-ve caso-blade angle-ve	Type rele' gen eolico completo / Asynchronous Machii misura energia anem blade angle LAMBDA 2 Lambdar inverso 2 Logic tubina3 General Load Type		OK Cancel Filter

Fig. 33 : Dettaglio scelta di componente

Premendo Ok si ritornerà alla precedente finestra e si noterà come alla voce "Object" viene riportato il componente scelto, mentre nella sezione centrale della stessa finestra è adesso attiva la voce "Variable Set" che prima era invece inattiva. Selezionando il pulsante 🔽 verrà fuori una lista (vedi Fig.10) che riporta tutti i raggruppamenti delle grandezze relative al componente scelto.

DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : protezioni event\Graphics Board\grafico(1)]	
Results - \nino\nino eolico\protezioni event\All calculations :	
Variable Set - protezioni event\All calculations\Variable Set(2).IntMon *	×
EMT-Simulation Harmonics Optimization Reliability Description Basic Data Load Flow VDE/IEC Short-Circuit Full Short-Circuit ANSI Short-Circuit RMS-Simulation	ок
Object         ▼ → caso base\\generatore asincrono	Cancel balanced
Display Values during Simulation in Output Window (see Simulation Command)     Filter or     Community Set Co	
Valade Set Calculation ratemeter Provide Set Calculation Patimeter Provide Set Calculation Patimeter Provide Set Calculation Patimeter P	rint Values (ariable List
Bus Name         Type I addition           Available Variables         Image: Display All	. List (page)
Inconstant       Selected Values         Inconstant       Name         Inconstant       Motor	

Fig.34: Dettaglio elenco tipi di grandezze presenti per il componente

Per ognuna di queste liste esisterà un gruppo di grandezze che verrà elencato nella parte sottostante della finestra. Selezionando una grandezza con un doppio click, questa apparirà nella colonna di destra; un secondo modo per fare ciò è selezionare una grandezza con un singolo click e premere poi il pulsante .

Punto 2) Si è adesso in grado di rappresentare gli andamenti delle grandezze selezionate nel foglio grafico. Portando il cursore del mouse su uno dei quattro grafici presenti sul foglio di lavoro, si proceda con un doppio click entrando così nella scheda del grafico come in Fig.11.



Fig.35: Dettaglio scheda della pagina grafica

Per il momento, è possibile saltare direttamente alla sezione inferiore della finestra denominata "Curves". Procedendo con un doppio click nella casella vuota della colonna "Element" verrà fuori una finestra che conterrà tutti i componenti della rete che sono stati scelti precedentemente come si può vedere dalla Fig.12.

Da questa finestra bisognerà scegliere un componente, selezionandone il simbolo nella colonna a sinistra e successivamente si potrà dare l'OK.

SubPlot - prot y-Axis x-Axis Name Scale I Use loc	tezioni ev   Advani Subplot/D al Axis	vent\Graphics ced Diagramm(2)	Board\ Scale	grafico(1)\Subplot	/Diagr	amm(2).VisP	lot	Cancel Define Res.	Default	
Mauimu	lease Se	lect Object	LUY.					I Filter I		×
Misimu	¥29 💊	V Pa	i l 🖃	Be as 22 th	***	AA 🗠 D	3			
Minimur		\ <i>d</i> o 4≦ €		100 Yes 11		999 <b>-</b> 9				ОК
- Adapt 9		Name		Grid	Ung	inal Location	туре	Out or Service		Cancel
© On	> (a)	generatore asir	crono	caso base	caso b	ase	Asynchronous N	Machii 🗖		
C Off	dst	Common Mode	tur3	caso base			misura energia turbina3			
	2	All calculations								
Automatic		Rete Esterna		caso base	caso b	oase				
Color										
 Shown Res										
Curves:										
Re									-	
E										
	Ln 1	5 object(s)	of 5	1 object(s) sele	cted					11.
		]					¥			
									144.00	192.00 [8]

Fig. 36: Dettaglio scelta del componente

Si è ritornati alla scheda del grafico e si noterà che la colonna "Element" adesso conterrà il componente che si è scelto. Per scegliere invece la grandezza che si vuole rappresentare bisognerà selezionare con un singolo click del tasto destro del mouse la casella vuota nella colonna "Variable". Verrà fuori un menù attivo, dal quale bisognerà selezionare la voce di "Edit" che farà comparire una finestra che elenca tutte le grandezze che erano state selezionate per il componente e dalla quale se ne dovrà scegliere una semplicemente trascinando il cursore sul nome seguito da un singolo click col tasto sinistro.

Adesso la scheda del grafico comparirà come nella Fig.13.



Fig.37: Dettaglio scelta grandezza elettrica

Selezionando OK la scheda del grafico scomparirà, mentre il grafico sul foglio di lavoro avrà in ordinata la grandezza selezionata ed in ascissa il tempo.

Nell' eventualità in cui si volessero rappresentare più grandezze nello stesso grafico, magari a scopo comparativo, bisognerà prestare attenzione agli ordini di grandezza delle due perché nel caso in cui fossero molto differenti allora solo una delle due grandezze si vedrebbe sul grafico e sarebbe quella di valore più elevato.

Comunque, si vedrà adesso come introdurre più grandezze nello stesso grafico. Si procede selezionando con un doppio click l'area del grafico entrando così nella scheda dello stesso. Successivamente andando direttamente nella sezione "Curves" si selezionerà con un singolo click del tasto destro del mouse la casella con il numero 1 facendo venir fuori una finestra di dialogo come in Fig.14.

	SubPlot - protezioni event\Graphics Board\grafico(1)\Subplot/Diagramm(2).VisPlot	×
-	y-Axis x-Axis Advanced	
	News Contractor (0)	
		Cancel
×		
	I Use local Axis Scale	Define Res.
	Limits Log. Auto Scale	Filter
	Maximum 1.059999	
	Minimum L0.05047515 O Log. O On	Export
	C Online	
		ŀ
	C Officer II.	
	Show Deviation from Offset	
	Automatic	
	Color Linestyle Linewidth Set now	
		-
	Shown Results	
	Lurves:	
	Element Variable Color Linestyle Linewidth Variable D Norm	
	▶ 1 deverstore asincrono s:pt 📃 2 0.1 🛛 🗖 🗖	
	Copy Pacte	
	Select All	
	Insert Rows	
	Append Rows	
	Delete Rows	

Fig. 38: Dettaglio selezione nuova riga

Selezionando la voce "Append Row" comparirà una seconda linea nella sezione "Curves", nella quale si potrà introdurre un nuovo componente nella colonna "Element" ed una nuova grandezza nella colonna "Variable", dopo di che si potrà dare l' OK.

Il software provvederà a differenziare i due andamenti con diversi colori, ma nulla vieta all'utente una scelta propria dei colori, come anche dello stile della linea in tipo e spessore.

Se dalla finestra di dialogo di cui alla Fig.14 si fosse scelta la voce "Append n Rows" sarebbe venuta fuori una seconda finestra con la richiesta di una valore numerico per 'n' dopo di che premendo OK n righe sarebbero comparse nella sezione "Curves".

Ritornando al foglio grafico, si potrà notare come ogni grafico abbia in ascissa il tempo espresso in secondi, impostato per default dal software.

Reimpostare diversamente tale asse delle ascisse, si potrà procedere nel seguente modo.
Con il solito doppio click sul grafico si accederà alla scheda dello stesso come in Fig.15.

y-Axis	x-Axis Ad	vanced			_			ОК
Name	Subpl	ot/Diagramm(2)						Cancel
Scal	le Ise local Avis		I					
	500 100011 1110		Scale					Denne He
Lir	nits		Log.	Auto Scale				Filter
Ma	simum [1.		C Log.	O On				Export.
M	nimum ju.			O Online				
- 44	lant Scale							
6	On Off	not 0						
		SP5						
С	Off _	Show Deviation f	rom Offset					
0	Off	Show Deviation f	rom Offset					
Auto	Off	Show Deviation f	rom Offset					
Auto	Off  matic Color	Show Deviation f	irom Offset	h Se	t now 1			
-Auto	Off  matic Color	Show Deviation f	irom Offset	hSe	t now			
Auto V (	Off matic Color F	Show Deviation f	rom Offset	h Se	t now			
Auto P ( Showe	Off matic Color n Results	Show Deviation f	irom Offset	h <u>Se</u>	t now			
Auto Auto Shown Curves	Off matic Color I n Results s: Result File	Show Deviation f	irom Offset	h Se calculations	t now	Variable D	. Nom	
Auto Auto Shown Curves	Off matic Color n Results s: Result File ElmRes	Show Deviation f	irom Offset	h Se calculations Color Linestyle	t now	Variable D.,	Nom	
Auto Shown Curves	Off matic Color n Results s: Result File ElmRes	Show Deviation f	iom Offset	h Se calculations Color Linestyle	t now	Variable D	. Nom	
Auto Shown Curve:	Off matic Color Results s: Result File EImRes	Linestyle     Pro     Element generatore asinci	rom Offset	h Se calculations Color Linestyle	E Linewidth	Variable D.	Norr	
Auto Showr Curves	Off  matic Color  Results s: Result File ElmRes	Linestyle     Pro     Element generatore asince	rom Offset	h Se calculations Color Linestyl	t now	Variable D.	Norr	
Auto Shown Curves	Off matic Color n Results s: Result File ElmRes	Element generatore asinct	rom Offset	h Se calculations Color Linestyl	t now	Variable D	Norr	
Curve:	Off Color Co	Linestyle     Element generatore asinct	Tom Offset	h Se calculations	e Linewidth	Variable D.	Norr	

Fig.39: Dettaglio scheda grafica

Si può notare come tale scheda abbia tre sotto cartelle (nella parte superiore della scheda); ebbene, per effettuare la variazione bisognerà passare alla cartella "x-Axis" che si presenterà come in Fig.16.

41	SubPlot - protezioni event\Graphics Board\grafico(1)\Subplot/Diagramm(2).VisPlot	×	
22	y-Axis x-Axis Advanced	ОК	-
	Name Subplot/Diagramm(2)	Cancel	-
<b></b>	Scale Axis	Define Ree	L
	C Local	Deline mes.	
	C Page	Filter	
		Export	
	Used Avia	_	
		-	
		-	• •
		-	-
			-
		-	
		-	• •
		-	•
		-	

Fig. 40: Dettaglio scheda grafica dell'asse X

Nella sezione "Axis" bisognerà selezionare la voce "Local", così comparirà una nuova finestra dove si dovrà descrivere il nuovo asse delle ascisse come in Fig.17.

Scale     Scale <sup>©</sup> Local <sup>©</sup> Chat <sup>©</sup> Graphics Board <sup>©</sup> Linear <sup>L</sup> Initian <sup>©</sup> Linear <sup>Maximum</sup> <sup>1</sup> . <sup>Maximum</sup> <sup>©</sup> Linear <sup>Auto Scale</sup> <sup>©</sup> Off <sup>Auto Scale</sup> <sup>©</sup> Off <sup>Auto Scale</sup> <sup>©</sup> On <sup>Auto Scale</sup> <sup>©</sup> On <sup>Auto Scale</sup> <sup>©</sup> On <sup>Auto Scale</sup> <sup>©</sup> On <sup>Auto Scale</sup> <sup>©</sup> On <sup>Auto Scale</sup> <sup>©</sup> On <sup>O</sup> Off <sup>O</sup>	Define Filte
Axis     Scale       C Local     C Chart       Graphics Board     C Chart       Limits     C Cinear       Maximum     C Cinear       Minimum     C Cinear       Auto Scale     C Off       C Don     C Dnine       Adapt Scale     C On       C On     Trigger       X Axis Variable     C Off       C Uses defined     C On	Define Filte
C     Local       C     Page       C     Graphics Board       Limits     Log.       Maximum     I.       Minimum     C       Adapt Scale       C     On       C     On       Adapt Scale       C     On       C     Off	Filte
C Page C Graphics Board Limits Maximum 1. Minimum 0. Adapt Scale C On Trigger Off XAxis Variable C Uses defined	Expo
C Graphics Board      Limits     Maximum 1.     C Linear     Minimum 0.     C Linear     C Linear     C Off     On     C Online      xAxis Variable     Uses defined	Expo
Linits     Log.     Auto Scale       Maximum     I.     C Linear     Off       Minimum     0.     On     On       Adapt Scale     On     Online       Adapt Scale     On     Online       Adapt Scale     On     Online	Exp
Limits       Log       Auto Scale         Maximum       1.       G Linear       O Iff         Minimum       0.       O Difie         Adapt Scale       O Difie         C On       Trigger       0.         × Axis Variable       0.       0.         C User defined       0.       0.	
Laines     Cuinear       Maximum     0.       C Linear     C Uninear       C Linear     C Onf       C Log.     Onf       Adapt Scale     Onine       C On     Trigger       Off     Off       Variable     Off	
Maxmum (I.     C. Log     C. On       Minimum (0.     C. Log     C. On       Adapt Scale     C. On     C. Onine       Adapt Scale     O.     C. Onine       XAsis Variable     O.     C. Uses defined	
Minimum     0.     Conine       Adapt Scale     Conine       © On     Trigger       0.     Conine	
Adapt Scale	
Adapt Scale On Trigger 0  Adapt Scale C User defined	
C On Trigger 0.	
x Axis Variable	
x Axis Variable	
xAxis Variable	
C User defined	
Te Distantia	
C Ime [s]	
O Time [min]	
C Time [h]	
C Frequency [Hz]	
C Harmonic Order [-]	

Fig. 41: Dettaglio definizione asse X

Si può andare adesso direttamente alla sezione "x-Axis Variable" e selezionare la voce "User Defined", quindi la finestra si modificherà come nella Fig.18.

Axis     Scale       Axis     Scale       Page     Chart       Graphics Board     Chart       Limits     Current       Maximum     1.       Minimum     Current       Adapt Scale     Onine	Cancel Define Res. Filter Export
Limits Limits Limits Linear Maximum 1 Limits Log Log C Unf C Of C On C Online	
Adaptiscale	
C Off	
User defined     User defined     User defined Legend	
C Time [min] C Time [h] C Frequency [Hz] C Harmonic Order [-]	

Fig.42: Dettaglio definizione asse X

A questo punto bisogna ricordarsi che in DIgSilent tutte le grandezze elettriche e non sono legate a dei componenti elettrici e non per cui per accedere ad una grandezza sarà necessario specificare prima il componente a cui essa appartiene. Detto ciò alla voce "Element" selezionando il pulsante 🗹 verrà fuori un menù attivo come in Fig.19 e dal quale bisognerà scegliere la voce "Select".

y-A	xis x:Axis Advanced	т ок
N	ame Subplot/Diagramm(2)	
	Scale	Lancel
	Axis	Define Res
	Local	
	C Page	Filter
	C Graphics Board	Export
		<u> </u>
	Limits Log Auto Scale	
	Maximum 1.	
	Minimum O C Log. C On	
	C Online	
	A dual Carda	
	Op      T	
	C Off	
	v Avis Variable	
	Ilser defined	
	C Default Element	
	O Time [us]	
	C Time [ms]	
	C Time [s] User defined Legend	
	C Time [min]	
	C Time [h]	
	C Frequency [Hz]	
	C Harmonic Order [-]	

Fig.43: Dettaglio selezione componente

Come si può notare dalla Fig.20, la nuova finestra invita alla scelta di uno dei componenti, scelta che avviene selezionando il simbolo nella colonna di sinistra.

DI Su	JbPlot	- Rete ba	ase + Gendis tipo D\G	raphics Board\Proj	ect1\Subplot/Diag	amm(2).VisPlot *	_	×	
4	Name	Sub	pplot/Diagramm(2)					tipo D 💌	à 🖞 📩 🗃
2	Sea	lease Se	lect Object				I Lancel		×
DD1001	G	12 >	< 🎖 🖻 🛍 🛃	🎭 60 🐝 🏤	21 M 🗭 🛙	3			
	¢		Name	Grid	Original Location	Туре	Out of Service		
	Ľ	•	Motore Asincrono 1	rete bt base	rete bt base	15 kw/0.4 kV/1/Y		<u> </u>	Cancel
			General Load	rete bt base		General Load Type			
	L L		Rete Esterna	rete bt base	rete bt base				
	м								
	м								
	a a								
	C								
								-	
	_×A								
	•	Ln 1	4 object(s) of 4	1 object(s) seler	ted 🗌				1.
		eraun. ime fuel	Element 💌 🕈						
	OT	ime [ms]	Variable		<u> </u>				
	ОТ	ime [s]	User defined Legend						
	OT	ime (min)							
	OT	ime [h]							
		requency ( armonic ()	[Hz] Irder [J]						
		umonic u	1001 []						

Fig.44: Dettaglio elenco componenti

Operata la scelta e dato l' OK si ritorna alla cartella iniziale, come si può vedere dalla Fig.21.

y-Axis X-Axis Advance	a)	, OK
Name Subplot/Dia	gramm(2)	
Scale		Lancel
Axis	Scale	Define Res.
Local     C Page	Chart	Filter
C Graphics Board		
		Export
11.5		
	Auto Scale	
Maximum [1.		
Minimum [0.	© Online	
-		
Adapt Scale		
• Un Trigger	0.	
u Auia ) (priphle		
User defined		
C Default Elem	ant 🔍 🔿 rete bt base\ \Bete Esterna	
C Time [us]		
C Time [ms]		
C Time [s] User	defined Legend	
C Time [min]		
C Time [h]		
C Frequency [Hz]		
· mannonic Urder [·]		

Figura 45: Dettaglio selezione variabile per asse X

A differenza di prima c'è il fatto che alla voce "Variable" saranno disponibili tutte le grandezze legate a quel componente scelto, che possono essere selezionate per configurare il nuovo asse delle ascisse.

Selezionando OK in questa cartella si ritornerà al foglio grafico, e si potrà notare come l'asse delle ordinate sia rimasto inalterato, mentre sarà cambiato l'asse delle ascisse del grafico.

### Paragrafo 2.7: Le simulazioni sul modello di base

Creato così lo schema a blocchi del generatore eolico, lo si sottoporrà a simulazioni di stabilità. Nella sostanza, si applicherà un gradino di potenza meccanica all'albero del generatore asincrono con partenza da fermo.

Si analizzerà il comportamento del generatore in due finestre temporali. La prima è quella dei primissimi istanti successivi all'applicazione del gradino e che metterà in mostra la dinamica della macchina asincrona.

A seguire si riporteranno gli andamenti di alcune grandezze caratteristiche del sistema in studio.

Nella Fig.22 viene riportato il transitorio iniziale della potenza immessa al nodo da parte del generatore eolico. Il transitorio è presente poiché all'istante zero viene applicato un gradino di potenza meccanica all'albero del generatore asincrono (partenza da fermo).



Figura 46:potenza attiva immessa al nodo

Nella Fig.23 si può notare come un transitorio sia presente anche nell'andamento della velocità angolare dell'albero del generatore asincrono.



Figura 47: velocità dell'albero motore

La Fig.24 riporta una finestra temporale che si estende sino ai 20 s e dimostra come ogni tipo di transitorio si sia estinto.



Figura 48: potenze in ingresso ed in uscita

Nella Fig.25 è rappresentata la potenza elettrica, con la sua u.d.m., con il suo transitorio iniziale e il suo comportamento a regime.



Figura 49: potenza elettrica attiva immessa al nodo

Analoga cosa è stata fatta per la velocità angolare in Fig.26, con la differenza che la stessa velocità è espressa in p.u..



Figura 50: velocità all'albero della macchina asincrona

Nella Fig.27 è rappresentato il  $c_p$  che come si vede ha valore costante poiché costanti sono le grandezze da cui dipende.



Figura 51: coefficient of performance

Dagli andamenti sopra riportati si possono delle informazioni importanti, come per esempio che la velocità di rotazione dell'albero a regime si mantiene costante attorno al valore nominale (il grafico presenta sulle ordinate valori in p.u. con base la velocità nominale della macchina).

Un'altra informazione è quella relativa alla potenza elettrica attiva immessa nella rete dal generatore eolico, che presenta un valore a regime di 2.05 MW, a giustificazione del fatto che il valore di vento di 15 m/s è quello che tira fuori dalla macchina la sua potenza nominale.

Se consideriamo adesso il grafico con le potenze  $P_t$  e  $P_{gt}$ , risulta per quest'ultima un valore negativo, probabilmente legato ad una convenzione di segno per i flussi di potenza in ingresso ed in uscita dai blocchi. Il coefficiente  $c_p$  è molto piccolo. Questa informazione la si trae dal confronto di tale valore con il valore massimo dello stesso coefficiente che è di 0.59 ( detto limite di Betz) oppure con il valore ottimale pari a circa 0.43. Quest'ultima informazione è nella realtà poco significativa, in quanto si sta lavorando con un modello approssimato nel quale sono state ipotizzate costanti quelle grandezze che influiscono sullo stesso  $c_p$ .

### Paragrafo 2.8: Modello base con vento variabile

In questo nuovo caso, lo schema a blocchi del generatore eolico rimane inalterato, solo che si andrà a riempire il blocco relativo al vento. Si prepara anzitempo un file di testo con un certo profilo di vento per un tempo di circa 50 s ( la durata non è vincolante ai fini della simulazione, motivo per cui si potrebbero introdurre profili di vento anche di ore ) dopo di che si fa in modo che il blocco vuoto attinga i suoi valori da tale file.

Questa volta, a differenza della precedente, ci interesseremo ad una sola finestra temporale, al fine di vedere come la velocità del vento influisce sulla produzione pi potenza meccanica e quindi elettrica.

Nella Fig.28 si nota che per il profilo del vento si è scelta una variabilità abbastanza regolare nel tempo ma che ricopre comunque l'intero intervallo di funzionamento delle velocità della macchina.



Figura 52: andamento del vento

Nella Fig.29 è riportata invece la velocità di rotazione dell'albero della macchina asincrona, e si può notare come essa varii in un intervallo di velocità ampio solo l'1% del valore nominale.



Figura 53:velocità all'albero

E' importante notare come la frequenza elettrica si mantenga costante ai 50 Hz (Fig.30).



Figura 54: Andamenti delle frequenze

Nella Fig.31 sono riportati gli andamenti delle potenze  $P_t \in P_{gt}$ , rispettivamente in ingresso ed in uscita dalla macchina asincrona.



Figura 55: Potenze in ingresso ed in uscita

Si può notare come il picco di produzione di potenza si attesti a 2.03 MW, ovvero circa uguale alla potenza nominale della macchina. L'ultimo grafico (Fig.32) che viene riportato è quello del coefficiente  $c_p$ , in funzione però del fattore  $\lambda$  e si può notare la sua dipendenza dalla velocità del vento. In questa curva manca ancora la dipendenza di  $c_p$  dall'angolo  $\mathcal{G}$ , che non farà altro che agire sui picchi.



### Figura 56: Coefficient of performance

### Paragrafo 2.9: Modello base, Vento variabile, Pitch control

L'ultimo passo di modifica dello schema a blocchi del generatore eolico sarà quello di introdurre un blocco per il calcolo del blade angle per ogni singolo valore della velocità del vento. Inoltre, sarà modificata la funzione di trasferimento che calcola il coefficiente  $c_p$ . Tale ultima modifica consentirà al blocco turbina eolica di lavorare sempre con il valore ottimale di  $c_p$  per qualsiasi valore della velocità del vento.

Queste due modifiche conducono, nella realtà, ad una variazione della incidenza delle pale della turbina, rispetto alla direzione del vento al fine di aumentarne l'efficienza. A seguire si riporta lo schema a blocchi nella sua forma finale (Fig.33)



Figura 57: Schema a blocchi finale del generatore eolico

Come nei due casi precedenti si riportano di seguito gli andamenti di alcune grandezze caratterizzanti l'intero schema a blocchi. Nella Fig.34 è raffigurato l'andamento della velocità del vento.



Figura 58: profilo del vento

Nella Fig.35 viene riportata la velocità angolare dell'albero della macchina asincrona, esprimendola in p.u.. Non è possibile scegliere le u.d.m. per le grandezze interne ai singoli componenti elettrici; è possibile, stabilita una base, sceglierle per le grandezze interne ai blocchi DSL.



Figura 59:velocità all'albero

Nella Fig.36 vengono riportate la potenza attiva immessa al nodo dal generatore e la potenza della turbina eolica, entrambe espresse in p.u.. Confrontando tale grafico con quello riportato in Fig.31 si potrà notare una prima differenza negli andamenti di entrambe le potenze attorno ai 20 s. Una seconda differenza la si può trovare confrontando i valori di picco. La ragione della prima differenza sta nel fatto che il  $c_p$  ha un intervallo di valori di velocità del vento in cui si mantiene sui suoi valori massimi, una volta fuori da tale intervallo lo stesso coefficiente si degrada con ripercussioni sul rendimento della conversione energia eolica-energia meccanica. Con il "Pitch Control" si riesce a fare in modo che il  $c_p$  abbia sempre valori elevati, al variare della velocità del vento, controllando l'angolo con cui la pala della turbina incide il vento. La seconda differenza trova spiegazione appunto con l'ottimizzazione del processo di conversione di cui sopra.



Figura 60: potenze alla macchina

Nella Fig.37 è riportata invece la potenza immessa in rete dal generatore espressa in MW.



Figura 61: potenza immessa al nodo espressa MW

Il grafico di Fig.38 mostra due andamenti, identificati con  $c_{po}$  e  $c_{pn}$ , i quali vengono prodotti dal blocco  $c_p$ . Nel normale funzionamento dello schema a blocchi ad ogni determinato istante arriva nel blocco  $c_p$  un nuovo valore di  $\theta$  che porta ad un nuovo valore di  $c_p$ . Questo valore di  $c_p$  verrà immagazzinato in una variabile temporanea chiamata  $c_{pn}$  ( $c_p$  new). Si confronterà tale valore  $c_{pn}$  (per mezzo della funzione "SELECT" di DIgSILENT) con il valore precedente di  $c_p$  immagazzinato in un'altra variabile temporanea chiamata  $c_{po}$  ( $c_p$  old). Tale valore di  $c_{po}$  è ricavato tramite l'uso della funzione "DELAY" di DIgSILENT.

Dal confronto dei due valori di  $c_p$  si sceglierà il più grande al fine di ottenere il massimo valore di potenza meccanica all'albero per quella determinata velocità del vento.

Nella realtà del generatore eolico alla scelta del  $c_p$  massimo segue un comando che ordina ad un servomotore la rotazione della pala fino al nuovo angolo  $\theta$ .



Figura 62: Andamenti di Cpo e Cpn

Dal grafico di Fig.39 si nota che l'andamento di  $c_p$  risultante segue la curva di  $c_{po}$  fintanto che  $c_{po}$  risulta maggiore di  $c_{pn}$  dopodichè salta sulla curva di  $c_{pn}$ .

Nonostante l'applicazione di tale processo di ottimizzazione il  $c_p$  rimane ben al di sotto del Limite di Betz di 0.59, raggiungendo il valore di 0.414. Nella letteratura dedicata a questi tipi di turbina viene considerato come valore ottimale di progetto  $c_p$ =0.43.



### Figura 63: Andamento del Cp risultante

Si può vedere dalla Fig.40 come la frequenza delle grandezze elettriche abbia un range di variazione di circa 0.14 % rispetto al valore nominale della frequenza.



Figura 64: Andamento della frequenza elettrica

## Paragrafo 2.10: Conclusioni

In tale progetto sono stati presi in considerazione solo alcuni dei fenomeni fisici interessanti il generatore eolico e questo per un più facile approccio al problema. Molti dei fenomeni come per esempio le turbolenze del vento vicino alla turbina, la direzionalità del vento ed infine tutte le perdite per attrito tra parti in movimento sono state trascurate anche perché più difficili da trattare. Non sono state descritte inoltre le dinamiche legate agli organi meccanici del gruppo turbine eolica che altro non fanno che ritardare le risposte degli organi stessi. Sono da ricordare effetti come la torsione dell'albero, la risposta dei servomotori che ruotano le pale( se ne dispone uno per ogni pala) etc. Nonostante tutto si è ottenuto quello che potrebbe essere un comportamento di base dello stesso generatore eolico.

Dalle simulazioni si è potuto osservare che qualunque valore di potenza attiva prodotta da quest'ultimo è una potenza che non viene prelevata dalla rete. La rete esterna deve dal canto suo sopperire sia alla richiesta di potenza reattiva del carico sia alla medesima richiesta da parte del generatore asincrono.

# **CAPITOLO 3**

# L'INFLUENZA DELLA GENERAZIONE DISTRIBUITA SULLE RETI BT

Paragrafo 3.1: Definizione della rete BT

La generazione distribuita può essere classificata in base alla potenza che si vuole immettere in rete nel seguente modo:

- 1) micro per potenze inferiori a 5 kW;
- 2) mini per potenze nell' intervallo (5-50) kW;
- 3) media per potenze nell'intervallo (50-1000) kW;
- grande per potenze superiori ad 1 MW e limite superiore indicativo di 10 MW.

La tipologia di rete che si vuole trattare in questo capitolo è una rete in BT di tipo rurale (e ciò per rendere più verosimile lo scenario di allacciamento della generazione eolica e di quella fotovoltaica).

Prima ancora di iniziare bisogna precisare che nella fase di definizione della rete in studio si procederà con l'introduzione di tutti i componenti elettrici successivamente si procederà con la definizione delle grandezze elettriche che caratterizzano ogni singolo componente ed infine si passerà al dimensionamento della rete globale per verificare il rispetto di alcuni vincoli come la caduta di tensione relativa percentuale nonché la convergenza della stessa rete in una simulazione di load flow.

Il primo passo sarà quello di disegnare sul foglio di lavoro di DIgSilent lo schema unifilare della rete che si vuole studiare come appare in Fig.1.



Fig. 65: Rete radiale BT

I componenti elettrici saranno tutti disponibili in colonna alla destra del monitor (vedi Fig.2). Bisogna fare attenzione al fatto che mentre alcuni componenti, come i nodi, possono essere trascinati semplicemente sul foglio di lavoro altri, come linee o trasformatori, richiedono di essere allacciati ai rispettivi nodi.

			6		
×≕×λ ⊧	≥?	=*	к		
4	B				
	—	—	•		
	$\bigcirc$				
	—	-0-	=	8	
	DOO	++			
	~-	-^-	-^+	~~	
	<b>₽</b>				
	S	•	(A) A A	83	
	<b>(</b> )	<b>(</b>	$\odot$		
	4			_	
	€ ₽	2	Ŧ	ಿ	
	(올) -	SUS			
	5	Ģ	0-	***	
	\$	2	р Â	+	
	¢	감	ŚŚ	ਲੂ	
	-t⊊l	-¶⊉ ∵	١œ	卒	
	Ŷ	員	<i>—</i>	~	
	(U) (U)	(U) (D)	1	÷	
	12	-क	0		
		4	1		
	A		0	0	

Fig. 66: Dettaglio componenti elettrici

Disegnato lo schema unifilare, sarà possibile procedere con la fase di allacciamento dei carichi. Il problema da risolvere è quello di capire quanti e quali carichi si vogliono collegare ai vari nodi della rete BT.

In linea generale, il limite di potenza per il quale risulta conveniente considerare la fornitura di energia elettrica in MT piuttosto che in BT è pari a circa 100 kW.

In uno scenario rurale, le tipologie di carico che è possibile trovare sono carichi di piccola taglia che assorbono solo potenza attiva (considerando trascurabile la potenza reattiva) come per esempio avviene nell' ambiente domestico, oppure ancora carichi che assorbono entrambe le potenze attiva e reattiva e che possono richiedere eventualmente un rifasamento come avviene per esempio nelle piccole officine.

Ai nodi dal 10 al 14 sono stati allacciati carichi monofase (uno per ogni nodo) con potenza di 9 kW che stanno a rappresentare agglomerati di abitazioni. Questi carichi verranno posizionati ai margini inferiori dello schema unifilare.

Ai nodi 7 ed 8 vengono inseriti due carichi che assorbono potenza attiva e reattiva come i motori asincroni e che vogliono simulare dei carichi industriali.

Per definire questi carichi si sceglieranno due strade diverse come verrà mostrato di seguito.

Per definire i carichi domestici bisognerà dare un doppio click sul simbolo del carico a seguito del quale comparirà una finestra di dialogo come in Fig.3.



Fig. 67: Dettaglio scheda carico

A questo punto selezionando il tasto 🗹 in corrispondenza della voce "Type" comparirà un primo menù attivo nel quale sono presenti tre voci come nella fig.4.



Fig.68: Dettaglio selezione tipo per il carico

La prima voce dall'alto è quella che permette di scegliere il tipo di carico tra quelli presenti nella libreria globale di DIgSilent, la seconda voce è quella che permette di effettuare la stessa scelta dalla libreria del progetto in studio, mentre la terza voce è quella che permette di introdurre nel progetto una tipologia di carico del tutto nuova.

Per i carichi domestici si sceglierà la terza strada, semplicemente spostando il cursore sulla voce "New Project Type" e facendo così apparire un secondo menù attivo come si è visto nella precedente figura.

Da quest' ultimo menù bisognerà scegliere la prima voce "General Load Type" con un singolo click del mouse ed avendo così l'accesso alla scheda del carico come è mostrato in Fig.5.

DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : rete bt base\\rete bt base] File Edit Calculation Data Output Options Window Help		
General Load - rete bt base \ \General Load(1).ElmLod		endis tipo D
Secretal Load - rete bt base\\General Load(1).EthLod Encral Load - rete bt base\\General Load Type(1).TypLod Be RMS-Simulation EMT-Simulation Harmonics Optimization R N. Basic Data Load Flow VDE/IEC Shot+Circuit Full Shot+Circuit Tis Name General Load Type(1) Tit System Type AC T Tit Technology ABC-D' T	eliability   Description   [ i   ANSI Short-Circuit   ]	Cancel
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	

Fig.69: Dettaglio scheda definizione del carico

In questa scheda come in quella precedente sono importanti, per i nostri scopi, solo due cartelle, ovvero quelle denominate " Basic Data " e " Load-Flow ".

Nella prima cartella due sono i campi più importanti da compilare, quello che definisce il carico come alternato o continuo, e quello in cui scegliere tra la configurazione di carico trifase oppure monofase.

Bisognerà prestare molta attenzione nel caso in cui si dovesse scegliere un carico monofase, perché bisognerà anche specificare quale dei quattro morsetti del carico si intenderà allacciare al bus.

Questo punto risulterà delicato solo nel caso in cui la linea che serve quel determinato bus sia monofase perché se la fase in arrivo al nodo (dalla parte della linea) e la fase selezionata per il carico avranno nomi diversi allora il carico non verrà alimentato, senza nessun messaggio di errore in quanto i due elementi sono stati costruiti correttamente.

A questo punto si può dare l' OK alla seconda scheda, ritornando alla prima.

Per definire invece i carichi industriali si ricorrerà alla libreria di DIgSilent la quale racchiude tutta una serie di componenti elettrici tra i quali i motori come mostrato nella Fig.6.

Nella sezione "Induction Machine" sono presenti le macchine asincrone a 50 ed a 60 Hz elencate in base alla loro tensione nominale. Per l'applicazione nella rete in studio si è scelta la categoria con tensione nominale di 400 V.



Fig.70: Dettaglio elenco macchine ad induzione

Da questa lista si sceglierà un tipo di motore asincrono e lo si copierà nella libreria di progetto usando i tasti di "Copy Object" e "Paste Object", i cui simboli sono rispettivamente 🖻 e 🖻 presenti nella barra degli strumenti dello stesso Data Manager. Ritornando allo schema unifilare si selezionerà con un doppio click il simbolo del motore asincrono e comparirà una finestra di dialogo riportata in Fig.7

DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : rete bt base\\rete bt base]     File Edit Calculation Data Output Options Window Help	
Image: State	iption
Basic Data Load Flow VDE/IEC Short-Circuit Full Short-Circuit ANSI Short-C Name Asynchronous Machine Type ▼ Terminal ▼ rete bt base\\Bus 9\Cub_4 Bus 9 □ Out of Service Number of	Cancel
yarallel Machines 1 Generator/Motor ○ Generator ○ Motor	

Fig.71: Dettaglio scheda carico

Per prima cosa, è possibile dare un nome all'oggetto che si sta per creare nell'apposito campo, successivamente alla voce "Type" si dovrà scegliere il tipo a cui puntare ed in questo caso tale tipo è residente nella libreria di progetto per cui selezionando il pulsante verrà fuori un menù attivo come nella fig.8 dal quale bisognerà scegliere la seconda voce con un click.



Fig. 72: Dettaglio scelta del tipo per il carico

Comparirà una nuova finestra (Fig.9) nella quale si deve scegliere il tipo di carico che nel nostro caso è il motore asincrono.

	DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graph	ic : rete	bt base\\rete bt base]			
	File Edit Calculation Data Output O	ptions	Window Help			
۲ و	Asynchronous Machine - rete bt ba RS-Simulation   EMT-Simulation	N£ ∰ ise∖\A Harmonic	図 記 図 語 部 の 節 synchronous Machine.ElmAsm s Optimization Reliability Descrip	otion OK	Rete base + Gendis tipo D 💌	
	lease Select 'Asynchronous Machine T	vpe/As	vnchronous Machine Type 2' - \nin	o\Rete bt\Library :		X
	Ē Ē 🎽 🗙 ‰ 🖻 🛍 📱	1 %	୫୯ 🐄 🏤 🎦 🙌 😅 🖬 Name	Туре	ОК	
lie	🕀 🗰 Blocchi Gene	<ul> <li>FIERD</li> </ul>			Cancel	
11			Eloconi Generatore Asincrono			- 1
	🕀 😥 Changed Settings	@	15 kW/0 4 kV/1/Y		Giobal Types	
11	Feeders	ŵ	15 kW/0.4 kV/1/Y(1)		Project Turses	
11		ŵ	37 kW/0.4 kV/1/Y		Project Types	
11	E GE SIM_IslandPV&Gen	ŵ	37 kw/0.4 kv/1/Y(1)			
11	H Kall Test DSLEvent	۲	Asynchronous Machine Type 2(6)			
11	THE COLUMN ExampleAsm	۲	Asynchronous Machine Type 2(7)			
11	E Cal eolico doubly fed					
1.	t - @∃ g.eolo					
Ч	🕀 🖾 gen. eolico					
Г	⊕ 6∃ generatore eolico					
L	ter va≊ linee protette					
	면 Kop nino doubly-red					
	The million of the second of t					
					11	
Ē.	Ln 1 8 object(s) of 38 1 o	bject(s) s	elected			11

Fig.73: Dettaglio lista componenti elettrici nella libreria

### Paragrafo 3.2: La progettazione della rete BT

Avendo definito tutti i carichi della rete in tutte le loro parti è possibile procedere oltre con il dimensionamento di tutte le linee della rete partendo dal basso e procedendo verso l'alto.

Bisogna fare a questo una precisazione, perché nella rete sono presenti delle linee che vogliono ricoprire il ruolo di rami ridondanti, che si riconoscono principalmente per il loro colore grigio, le altre linee sono nere, e secondariamente perché hanno uno degli interruttori estremali aperto. Questi rami vengono lasciati aperti ad un estremo (solitamente telecomandato) al fine di assicurare la radialità della rete ma che vengono chiuse al momento di un guasto sopraggiunto su una o più linee adiacenti permettendo così la continuità di alimentazione per il carico attraverso un nuovo percorso.

Per dimensionare le linee si procederà calcolando la corrente di impiego  $I_b$  assorbita da ciascun carico (di cui è nota la potenza assorbita).

Per la scelta delle sezioni delle linee si è fatto riferimento alla tabella UNEL 35023-70 riportata nella Tab.1, per cavi con conduttore in rame, isolamento in gomma o materiale termoplastico e con temperatura caratteristica fino ad 80  $^{\circ}C$ .

Sezione Nominale	Cavi Unipolari		Cavi bipolari e tripolari		
[mm^2]	Resistenza [mOhm/m]	Reattanza [mOhm/m]	Resistenza [mOhm/m]	Reattanza [mOhm/m]	
1,5	14,8	0,168	15,1	0,118	
2,5	8,91	0,155	9,08	0,109	
4	5,57	0,143	5,68	0,101	
6	3,71	0,135	3,78	0,0955	
10	2,24	0,119	2,27	0,0861	
16	1,41	0,112	1,43	0,0817	
25	0,889	0,106	0,907	0,0813	
35	0,641	0,101	0,654	0,0783	
50	0,473	0,0965	0,483	0,0779	
70	0,328	0,0975	0,334	0,0762	
95	0,236	0,0939	0,241	0,0751	
120	0,188	0,0928	0,191	0,074	
150	0,153	0,0908	0,157	0,0745	
185	0,123	0,0902	0,125	0,0742	
240	0,0943	0,0895	0,0966	0,0752	

Tab. 1: Resistenze e reattanze per unità di lunghezza dei cavi elettrici per BT

Nella Tab. 2 vengono riportate le sezioni di tutte le linee della rete BT.

	corrente di linea [A]	portata [A]	sezione [mm^2]	resistenza [mOhm/m]	reattanza [mOhm/m]
linea 0-1	90	101	25	0,907	0,0813
linea 0-2	75	101	25	0,907	0,0813
linea 1-3	38	57	10	2,27	0,0861
linea 1-4	51	57	10	2.27	0.0861
linea 2-4	51	57	10	2,21	0,0001
linea 2-5	63	76	16	1,43	0,0817
linea 3-6	13	32	4	5,68	0,101
linea 3-7					
linea 4-7					
linea 4-8	26	57	10	2,27	0,0861
linea 5-8	-8 -9				
linea 5-9					
linea 6-10					
linea 6-11					
linea 7-11	1	25	1,5	15,1	
linea 7-12	13				0 118
linea 8-12	-12				0,110
linea 8-13					
linea 9-13					
linea 9-14	4				

Tab. 2: Caratteristica delle linee

Con tali valori si potranno definire adesso tutte le linee della rete BT. Per tale definizione bisogna prima di tutto selezionare il componente linea nello schema unifilare con un doppio click, in maniera tale da accedere alla sua scheda, Fig.10.

<b>D</b>	IgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : rete bt base\	\rete bt base]		
	Line - rete bt base\\Line.ElmLne			×
1	RMS-Simulation EMT-Simulation Harmonics Basic Data Load Flow VDE/IEC Short-Circui	Optimization   Reliabilit :   Full Short-Circuit	y Description ANSI Short-Circuit	OK
Ŷ	Name Line			Cancel
	Туре 💌 🔸			Figure >>
	Terminal i ▼ → rete bt base\\Bus 3\Cub_6	Bus 3		lump to
÷	Terminal j	Bus 6		Jump to
	Zone Terminal i			
	□ Dut of Service         Number of         parallel Lines         □         Parameters         Length of Line         □         Laying         Ground         Line Model	sulting Values ed Current 0. k/ : Seq. Impedance, Angle 0. di : Seq. Impedance, Angle 0. di : Seq. Resistance, R1 0. 0 : Seq. Reastance, X1 0. 0 o Seq. Resistance, R0 0. 0 o Seq. Reastance, X0 0. 0 th-Fault Current, Ice 0. A th Factor, Magnitude 0. th Factor, Angle 0. di	A hm Pg hm hm hm hm hm	
1	<ul> <li>Lumped Parameter (PI)</li> </ul>			
1	O Distributed Parameter			
	Davides (Cabieles (Castiens			
<u>   </u>				

Fig. 74: Dettaglio scheda linea elettrica

In tale cartella bisognerà riempire per primo il campo "Name", successivamente si dovrà definire il tipo per la linea selezionando il tasto 🖬 alla voce "Type"; dal menù attivo che verrà fuori si dovrà scegliere la voce "New Project Type" e successivamente "Line Type" come in fig.11.

DMC Circulation	L DMT Circulation L Have	uter I Orthological D	Estates I Description	1
Basic Data	Load Elow VDE/EC Sh	onics   Optimization   Ri art-Circuit   Full Short-Circuit	ANSI Short-Circuit	OK
Name		- Turisholesicak	ANOT SHORE CIRCUIC	Cancel
Type	▼ →			Figure >:
Terminal i	Select Global Type Dub	_6 Bus 3		
Terminal i	Select Project Type	5 Bue 6		Jump to .
Zone	New Project Type 🕨 L	ine Type (TypLne)		
2010	Remove Type	ower Type (TypTow)		
Out of Service		ower deollieury Type (Typaeo)	_	
Number of		Resulting Values		
parallel Lines	1	Rated Current	0. kA	
		_ Pos. Seq. Impedance, ∠1 Pos. Seq. Impedance, ∆ngle	0. Unm 0. deg	
Parameters		Pos. Seq. Resistance, R1	0. Ohm	
Length of Line	1. km	Pos. Seq. Reactance, X1	0. Ohm	
Derating Factor	1.	Zero Seq. Resistance, R0	0. Ohm	
Lauina	Ground	Zero Seq. Reactance, X0	0. Ohm	
Laying		Earth-Fault Current, Ice	0. A	
		Earth Factor, Magnitude	U.	
		Earth Factor, Angle	0. deg	
Line Model				
Cumped Para	meter (PI)			
C Distributed Pa	arameter			
Routes/Cubic	les/Sections			

Fig.75: Dettaglio selezione del tipo per la linea

In Fig.12 sono importanti i campi dove si definisce la tensione nominale, la frequenza di funzionamento, la tipologia di linea (cavo, cavo non armato oppure linea aerea) ed infine nella parte inferiore si trovano i campi per i parametri elettrici.

DIgSIL	ENT PowerFactory 1 • rete bt base\\Lir Line Type - Library	13.1 - [Graphic : rete bt base\\rete bt base] ne.Elmt.ne \Line Type(25).Typt.ne	×
	Intertype - Library RMS-Simulation Basic Data Name Rated Voltage Rated Current Nominal Frequency Cable / OHL System Type Parameters per Le Resistance R' Reactance X'	Line Type(25) Typine         EMT-Simulation       Harmonics       Optimization       Reliability       Description         Load Flow       VDE/EC Short-Circuit       Full Short-Circuit       ANSI Short-Circuit         Q       KV         1       KA (in ground)       Rated Current (in air)       1       KA         50       Hz       KA       Solution       Rated Current (in air)       1       KA         Gable       Image: Contract of the state of the s	Cancel

Fig.76: Dettaglio scheda di definizione della linea

Riempiti tutti i campi, si può dare l'OK e ritornare alla precedente scheda, dove si dovrà dire quanto è lunga la linea, quante linee dello stesso tipo si intende mettere in parallelo ed infine si potrà dare l'OK anche a questa scheda avendo definito completamente il componente.

## Paragrafo 3.3: Il dimensionamento della rete BT

Eseguendo una simulazione di Load Flow ,con la rete nella configurazione ottenuta al paragrafo precedente, si nota che la caduta di tensione relativa percentuale tra il bus 0 (corrispondente all'uscita della stazione MT/BT) ed i bus di carico assume un valore troppo elevato rispetto al 4% richiesto dalla norma.

I dati numerici sono visibili sullo stesso foglio di lavoro dello schema unifilare nei box immediatamente a ridosso dei singoli componenti elettrici. Le grandezze che si vuole siano disponibili in tali box possono essere scelte arbitrariamente da un elenco a cui si può accedere dando un click con il tasto destro del mouse sul box interessato, facendo così comparire un menù attivo come in Fig.13.



Fig.77: Dettaglio menù attivo dei box

Da questo menù bisognerà scegliere la voce "Edit Format for Nodes". Comparirà una nuova finestra di dialogo come a seguire. In tale finestra si dovrà selezionare la voce "Select Variables", avendo così accesso all' intero elenco di grandezze disponibili per il dato componente, come si potrà vedere in Fig.14.

Fig.78: Dettaglio scheda descrittiva del box

Dalla finestra denominata "Available Variables" in Fig.15 si possono scegliere le grandezze (semplicemente con un doppio click) che man mano appariranno nella colonna di sinistra denominata "Selected Variables".

EMT-Simulation	Harmonics Optimization Reliability Description	
Basic Data	.oad Flow VDE/IEC Short-Circuit Full Short-Circuit ANSI Short-Circuit RMS-Simula	ation
Object	▼ → rete bt base\\Bus 11	Cancel
Class Name		balanced
Display Values du	ig Simulation in Output Window (see Simulation Command)	
Filter for		
Variable Set	Currents, Voltages and Powers	Print Values
Variable Name	×	W. STETS
Bus Name	Display All	Variable Lis
	/ → Display Air	V. List (page
Available Variables	Selected Variable	is
ur	p.u. Voltage, Real Part	_
ui	p.u. Voltage, Imaginary Part 👘 🛁 m:u	
upc u1	A voltage, magnitude	
uine	% Voltage Magnitude	
ulr	p.u. Positive-Seguence Voltage, Real-Part	
uli	p.u. Positive-Sequence Voltage, Imaginary-Par	
Pgen	kW Generation, Active Power	
Qgen	kvar Generation, Reactive Power	
Pmot	kW Motor Load, Active Power	
Qmot	kvar Motor Load, Reactive Power	
Pload	kw General Load, Active Power	
Peomp	kvar Gemeensetion (Losses)	
Ocomp	kwar Compensation	
Pnet	kW External Networks, Active Power	
Qnet	kvar External Networks, Reactive Power	
Pflow	kW Power Flow, Active Power	
Qflow	kvar Power Flow, Reactive Power	
umin	p.u. Minimum Voltage	
Umin	V Minimum Voltage (Line to Neutral)	
loumax	Aaximum voltage brop along reeder	
17		

Fig.79: Dettaglio lista delle grandezze elettriche

Premendo OK si ritornerà allo schema unifilare e lanciando una simulazione di loadflow i dati numerici compariranno nei rispettivi box (Fig.16). Inoltre, trascinando il cursore del mouse sul box comparirà una finestra che riporterà sia il nome di tutte le grandezze e sia il loro valore numerico per una più veloce lettura (Fig.17).



Fig.80: Dettaglio box



Fig.81: Dettaglio box menù a scomparsa

Ritornando al problema iniziale del dimensionamento della rete, per aggiustare le cose si possono seguire due strade:

- 1) agire sulla sezione dei conduttori;
- 2) costruire delle linee in parallelo.

Lo scopo comune dei summenzionati metodi è quello di agire sulla impedenza di linea e nel nostro caso specifico si agirà per diminuirla.

Con le dovute trasformazioni la rete BT , nella sua configurazione rimane la stessa come raggio di azione (circa 1 km) ma le sezioni dei vari tratti di linea sono state modificate ( semplicemente passando a sezioni superiori ) ottenendo per ciascuna linea la caduta di tensione relativa percentuale come riportato nella Tab.3.

	sezione iniziale [mm^2]	sezione finale [mm^2]	
linea 0-1	25	150	
linea 0-2	25	150	
linea 1-3			
linea 1-4	10	120	
linea 2-4			
linea 2-5	16	120	
linea 3-6	4	70	
linea 3-7			
linea 4-7		70	
linea 4-8	10	70	
linea 5-8			
linea 5-9		95	
linea 6-10			
linea 6-11			
linea 7-11		25	
linea 7-12	15	23	
linea 8-12	١,٥		
linea 8-13			
linea 9-13		50	
linea 9-14		50	

## Tab. 3: Tabella delle nuove sezioni

Con tali interventi su tutti i tratti di linea si è reso possibile contenere, nei punti più lontani dalla stazione MT/bt, una caduta di tensione relativa percentuale entro la soglia limite ammissibile del  $\pm 4\%$ .

Le verifiche vengono quando si lancia una simulazione di Load-Flow che fornisce tra l'altro una convergenza entro le prime tre iterazioni.

### Paragrafo 3.4: I diagrammi di carico

I carichi che sono stati introdotti nella rete BT in studio assorbono, per come sono stati definiti, una potenza costante, ma questa non è una condizione corrispondente alla realtà. Si è preferito, per tale motivo, far si che gli stessi carichi assorbano potenza seguendo gli andamenti descritti nei diagrammi di carico. I diagrammi di carico che sono stati utilizzati forniscono le potenze assorbite dai carichi domestici ed industriali nell'arco di una giornata come mostrato rispettivamente in Fig.18 ed in Fig.19.



Fig.82: Andamento del carico domestico giornaliero



Fig.83: Andamento del carico industriale giornaliero

Per poter fruire di tali andamenti nelle simulazioni con il software DIgSilent, c'è la necessità di una loro campionatura al secondo questo perché il secondo costituisce il passo della RMS SImulation che si intenderà eseguire per lo studio della rete.

Al fine di poter passare ad un campionamento per secondo per entrambi i grafici, si è utilizzato il metodo della retta di regressione. In tale metodo è stata introdotta una modifica riguardante la deviazione standard; infatti, mentre nel metodo originale il calcolo della deviazione standard viene effettuato ad ogni nuovo ciclo, nel caso in esame si è partiti invece da uno studio condotto sull'assorbimento di potenza di varie

tipologie di carico, il quale contemplava anche la conoscenza della distribuzione giornaliera della deviazione standard relativa percentuale.

Partendo da tale studio, si è ricavato l'andamento della deviazione standard con un campionamento al minuto come in Fig.20.



Fig.84: Andamento della deviazione standard

A tale andamento è stato applicato il metodo della interpolazione lineare, arrivando così ad un campionamento per secondo come desiderato.

L'applicazione del metodo della regressione è stata effettuata con l'ausilio del software Matlab al quale si fornivano in ingresso due vettori, uno costituito dai valori delle potenze, il secondo costituito dai valori della deviazione standard.

Gli andamenti che si sono ottenuti in uscita vengono rispettivamente mostrati in Fig.21 ed in Fig.22.



Fig.85



Saranno questi gli andamenti delle potenze che verranno usati durante le simulazioni con il software DIgSilent, anche se non in questa forma. Il software DIgSilent consente l'introduzione di caratteristiche nella modalità seguente; introdotto un carico nello

schema unifilare lo si seleziona con un doppio click accedendo così alla sua scheda descrittiva come in Fig.23.

ļ	4	IgSILENT PowerFactory 13.1	l - [Graphic : rete	e bt base\\rete bl	: base]		
Ì		General Load - rete bt base\	\General Load	ElmLod		×	L
	¥	RMS-Simulation EMT-Simula Basic Data Load Flow V[	tion   Harmonics DE/IEC Short-Circui	Optimization Relia t Full Short-Circuit	ability Description ANSI Short-Circuit	OK	Re
	<b>e</b>	Input Mode	Default	<b>.</b>		Cancel	I
	1	Balanced/Unbalanced	Balanced	•		Figure >>	1
	1	Operating Point			1		1
	1	Total Active Power Load	0.	kW			
	1	Total Reactive Power Load	0.	kvar		Jump to	L <sub>r</sub>
	1	Voltage	1.	p.u.			I.L
	1	Scaling Factor	1.	j			l.
	1	Adjusted by Load Scaling					Γ
	:						
	:						Ŀ
	-						Ŀ
	:						374.04
	÷						
							30
	-						Fr
	-						Ľ.
							Ŀ
1							F

Fig. 87: Dettaglio scheda descrittiva del carico

Andando direttamente alla sezione "Operating Point" portando il cursore nel primo campo bianco, quello della potenza attiva, e selezionandolo con un singolo click del tasto destro appariranno due menù attivi in sequenza come in Fig.24.

D	DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : rete bt base\\rete bt base]		
0	General Load - rete bt base\\General Load.ElmLod	×	
4 4	RMS-Simulation         Emmonion         Optimization         Reliability         Description           Basic Data         Load Flow         VDE/IEC Short-Circuit         Full Short-Circuit         ANSI Short-Circuit	ок	Rete
÷	Input Mode Default	ancel	<b>∔</b> 
÷	Balanced/Unbalanced Balanced Tig	ure >>	
÷	Operating Point		
•	Total Active Power Load New Characteristic ► Scalar Value		
	Total Reactive Power Load 0. Edit Characteristic Discrete Time Charact	eristic	F
	Voltage 1. Edit All Characteristic One Dimension - Vector Two Dimension - Matri	or Y	l
	Scaling Factor 1. Delete Characteristic Characteristic from Fil	е	þ
	C Adjusted by Load Scaling Reference		
			1
			•
			1
		-	Ļ
			31
			IГ
			Car
			÷
I		[	

Fig.88: Dettaglio menù caratteristica di carico

Ognuna delle voci presenti nel secondo menù attivo serve per l'introduzione di caratteristiche di diverse tipologie ma la cosa che hanno in comune è la necessità di introdurre una scala. La stessa cosa può essere fatta anche per la potenza reattiva.

Nel caso in esame tale scala è rappresentata da una scala tempi per cui adesso vedremo come costruirla e scoprire il perché, sempre nel caso in esame della rete BT, non è stato possibile usare nessuna delle precedenti strade per introdurre i diagrammi di carico.

Per introdurre una scala tempi bisogna prima aprire il Data Manager e selezionare la griglia attualmente attiva nel progetto con un singolo click, dopo di che bisogna selezionare il tasto in presente nella barra degli strumenti dello stesso Data Manager e ciò farà apparire una finestra di dialogo come in Fig.25. In questa finestra si trova una lista di oggetti dalla quale bisognerà selezionare "Others", dopo di che nel campo "Filter" bisognerà selezionare il tasto e dalla lista si dovrà scegliere la voce "Scale and Trigger".



Fig.89: Dettaglio elenco oggetti di DIgSilent

A questo punto, che nel campo "Element" si dovrà scegliere la voce "Time Scale" e dare successivamente OK per potere entrare nella scheda descrittiva la scala tempi come in Fig.26.

Come si può vedere dalla Fig.26 la scala tempi può essere denominata, si può introdurre l'u.d.m. per il tempo selezionando il tasto 🔽 alla voce "Unit" e scegliendo i secondi (c'è
la possibilità di scegliere dal secondo all'anno), si può introdurre il numero di secondi che si vuole costituisca tale scala, che in tale caso sarà 86400.

DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : rete bt base\\rete bt base]	
🗖 📴 Data Manager - \nino\Rete bt\rete bt base\Base + Gendis :	
🚰 🗈 📾 뙵 🗙 🌡 🛍 🛍 🖬 🚳 60° 🕺 🊣 🖽 🛤	A 🛃 😂 🔒
Time Scale - rete bt base\\Time Scale.TriTime	Nininal I and Sa
Name Time Scale	ОК
Unit h	Cancel
Date and Time of Calculation Case nd Time of Calculation	Case
Scale:	Descript. >>
Scale Values	
·	
Le 60 - 60 akirat/a) af 60 - L akirat/a) aslasted - Duas 8 Duas	
	· · · · · · · · · · · ·
I Prete bt base / Project1	

Fig.90: Dettaglio definizione scala tempi

Per introdurre questi valori bisognerà selezionare il tasto **I** presente nella sezione "Scale" con un singolo click del tasto destro del mouse a seguito del quale verrà fuori un menù attivo come nella Fig.27 dal quale si dovrà scegliere la voce "Append n Rows" che porterà ad una nuova finestra che chiederà il numero di righe che si intende introdurre nella colonna.



Fig. 91: Dettaglio definizione numero righe

Avendo dato l'Ok alla precedente finestra si potrà notare, adesso, che la colonna "Scale Values" conterrà 86400 righe come si vede in Fig.28. Qui sorge il primo grosso problema costituito dal fatto che bisogna riempire le caselle vuote manualmente.

DI	IgSIL	ENT PowerF	actory 1	3.1 - [Gr	aphic : ret	e bt base	e∖…\rete bt b	oase]	
	<b>時</b> 日	ata Manage	er - \nind	\Rete b	t\rete bt l	oase\Bas	e + Gendis :		
1	£		× %	<b>B</b> (	1   🛃 «	🌡 60 🖞	🥁 🏤 🖬	<b>M</b> A -	2 🛩 🖬
2		Time Scal	e - rete l	bt base\	conco \Time So	ale di pr	ova.TriTime	NI	×
		Name Unit		Time Sca	ale di prova	-1			ОК
		Date and	Time of C	alculation	Case -	•	nd Time of Cal	culation Case	
		Scale:	Scale V	alues					Descript. 77
		86391 86392		0. 0.				<b>_</b>	
		86393 86394		0. 0.					
		86395		U. 0.				_	
		86398 86399		0. 0.					
		►86400	•	0.				▼ ▶	
			9 Chance	ad Satting	°	, PF			
:		n 60   60 ob	ject(s) of	60	1 object(	s) selected	J Drag &	. Drop	
	]: : ● ●	rete bt b	ase / Pr	ject1 /	<u>.</u>				· · · · · · · · · · ·

Fig. 92: Dettaglio colonna dei tempi

Supponendo di aver inserito i valori numerici nelle caselle vuote si potrà andare avanti dando l'OK. A questo punto bisogna introdurre la caratteristica di carico, per cui si selezionerà con un doppio click, nello schema unifilare, il carico interessato.

Nella scheda del carico si andrà nella cartella "Load Flow" e nella sezione "Operating Point" si selezionerà con il tasto destro il campo bianco in corrispondenza della potenza attiva, accedendo così al menù attivo come è già stato fatto precedentemente .

Da questo menù si dovrà scegliere la voce "One Dimension – Vector" faceno così apparire una finestra come in Fig.29. In questa nuova finestra bisogna selezionare il pulsante ☐ alla voce "Scale" in modo tale da introdurre la scala tempi precedentemente costruita.

4	DI	Parameter (	Characteristic - Vector - rete bt base\\General Load\plini.ChaVec	×
*	Ge	Curve Diag	gram	ок
	B	Parameter	plini	Canaal
Å	I	Scale	<b>▼ →</b>	
		Val	ues	Descript. >>
	-	▶1	0.	
	L			
		Approvimati		
		Relupoprial		
		Current Valu	ле 100,	
		Current Valu	зеугее <sub>т</sub> о .re 100,	

Fig.93: Dettaglio introduzione caratteristica di carico

Verrà fuori un primo menù attivo dal quale scegliere la voce "Select", successivamente verrà fuori una finestra di dialogo che invita appunto alla scelta di una scala tempi come in Fig.30. La scala va selezionata con un click sul simbolo

DI Parameter Characteristic - Vector - rete b Ge Curve Diagram	t base\\General Load\plini.Cha¥ec	OK R	ete base + Gendis tipo A 💌 🔯
Please Select 'Tri*' - \nino\Rete bt\rete bt bas	e\Base + Gendis : 60 2 2 4 6 6 1 2 4 4 2 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	ion Type	OK Cancel Filter
	,		

Fig. 94: Dettaglio elenco scale tempi disponibili

Avendo dato l'OK si otterrà il risultato come in Fig.31.

	DIgS	ILENT PowerFacto	ry 13.1 - [Graphic : rete bt base\\rete bt base]	
Ξ	Gene	eral Load - rete bt	base\\General Load.ElmLod	×
ž	R١	Parameter Chara	teristic - Vector - rete bt base\\General Load\plini.ChaVec	* 🗙
4	Ba	Curve Diagram		ок
	In	Parameter plini		
	в.	Scale 💌	▶ rete bt base\\Time Scale di prova	Cancel
	Г	Values		Descript. >>
		▶ 0. s 0.		
11		0. s 0.		
H		0. s 0.		
		<u>0. s</u> 0.		
H		<u> </u>		
		0.8 0.		
L i		0.8 0.		
		0. s 0.		
11		0. s 0.		
$\left  \cdot \right $				
		Usage	relative in %	
		Approximation	constant 💌	
		Polynomial Degree	3	
H		Current Value	0.	

Fig.95: Dettaglio scheda caratteristica di carico

A questo punto si incontra il secondo grosso problema, ovvero bisognerà introdurre tutti i valori della potenza uno ad uno. Un terzo problema è costituito dal fatto che la colonna che riporta la numerazione dei secondi (quella sulla sinistra) perde in alcuni tratti tale numerazione, come è possibile vedere in Fig.32.

DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : rete bt base\\rete bt base]     IGeneral Load - rete bt base\\General Load.ElmLod	×
RMS-Simulation   EMT-Simulation   Harmonics   Optimization   Reliability   Description	n OK
Parameter Characteristic - Vector - rete bt base\\General Load\plini.ChaVe           Curve         Diagram	
Parameter plini	
Scale ▼ → rete bt base\\Time Scale di prova	
Values	Descript. >>
. 0. s 0.	
0. s 0.	
0.	
Usage absolute	
Approximation constant	
Polynomial Degree 3	
Current Value 0.	

Fig. 96: Dettaglio errore nella caratteristica di carico

Nel caso in cui però si intenda utilizzare tale strada per introdurre una caratteristica, occorrerà prestare attenzione agli altri due campi nella parte inferiore. Nel campo chiamato "Usage" bisogna selezionare la modalità secondo cui si vogliono introdurre le ordinate del grafico, nel senso che è possibile introdurre i valori in maniera assoluta, relativa oppure relativa percentuale, in questi ultimi due casi si fa riferimento al valore base introdotto nella sezione "Operating Point". Nel campo chiamato "Approximation" si deve invece scegliere il modo in cui si vuole effettuare l'interpolazione tra due punti consecutivi con la possibilità di interpolazione costante, lineare, polinomiale, spline ed infine hermitiana. Eseguita anche quest'ultima scelta, andando nella cartella "Diagram" della stessa finestra sarà possibile vedere l' andamento della grandezza in questione. Abbandonata questa strada per via dei problemi incontrati si è deciso di associare i diagrammi di carico alle relative utenze usando la programmazione DSL. Il software DIgSilent permette la lettura di file di testo usando un oggetto chiamato "Measurement File" che non possiede nessun ingresso ma che può fornire fino a 10 segnali diversi in uscita.

Il primo passo da eseguire è quello della preparazione del file di testo, il quale deve avere una intestazione particolare e deve contenere due colonne, di cui la prima contenente il tempo mentre la seconda i corrispondenti valori della grandezza da rappresentare. E'importante che ciascun valore della seconda colonna sia distanziato di un solo intervallo di "backspace". Detto ciò, il file di testo dovrà comparire come in Fig.33.



Fig.97: Dettaglio file testo

A questo punto sarà possibile definire il Measurement File, selezionando nella finestra del Data Manager la griglia attualmente attiva con un singolo click del tasto sinistro del mouse. Successivamente si selezionerà, dalla barra di stato dello stesso Data Manager, il pulsante 🗈 aprendo così la finestra di dialogo "Element Selection" come in Fig.34.

In questa finestra bisognerà scegliere prima la categoria di elementi "Others", successivamente nel campo "Filter" bisognerà selezionare la voce "Net Elements" ed infine nel campo "Element" bisognerà scegliere l' oggetto "Measurement File" dopo di che si potrà dare l' OK.



Fig.98: Dettaglio definizione Measurement File

Si è arrivati adesso nella finestra descrittiva del Mearument File, che si presenterà come in Fig.35 .

D	IgSIL	ENT Powe	rFactory	13.1 - [Gi	aphic : r	ete bt bas	e∖…\rete bt l	oase]			
	D.	ata Mana	ger - \nin	o\Rete b	t\rete b	t base\Rel	e base Tipo I	B:			
	Ē	Measure	ement File	- rete bl	: base\	\Measure	nent File(1).I	ElmFile		×	ſ
<b>æ</b>		RMS-Si Basic D	mulation   ata   Loa	EMT-Simu d Flow	ilation   H VDE/IEC	Harmonics   Short-Circuit	Optimization Full Short-C	Reliability ircuit   ANS	Description	ОК	E
1::		Name		Meas	urement Fi	le(1)				Cancel	ŀ
		Import f	rom	Meas	urement Fi	ile	•			Descript. >>	ŀ
		Filenam	e								F
											ŀ
		🗖 Out	of Service								E
::		Conver	sion for eac	:h Output y	i = a*xj+b:						╞
			Column j	Factor a	Factor b						ŀ
		►y1	1	1.	0.		<b>_</b>				E
		y2	2	1.	0.						ŀ
1::		y3	3	1.	0.						ŀ
		y4	4	1.	U. 0						F
1::		y5 V6	6	1.	0.						E
But		y7	7	1.	0.						L
		y8	8	1.	0.						ŀ
		y9 10	9	1.	0.						h
		910		- I. 			<u> </u>				
	<u>ы</u>				1						
	LL										1

Fig.99: Dettaglio finestra di definizione Measurement File

In tale scheda bisognerà focalizzare l'attenzione solo su due campi. Il primo sarà quello detto "Import From", nel quale si dovrà selezionare la voce "Measurement File", mentre il secondo campo sarà "Filename", nel quale si dovrà introdurre il percorso che permetterà a DIgSilent di trovare il file testo dal quale attingere i dati numerici per la simulazione. Si potrà notare adesso che l'oggetto Measurement File compare nella lista degli oggetti pertinenti alla griglia attiva con il suo simbolo [10]. Un vantaggio di tale metodo è quello che uno stesso Mesurement File può essere tranquillamente condiviso da più componenti dello stesso progetto senza dar luogo ad errore alcuno.

Adesso si ricorrerà alla programmazione DSL, al fine di collegare i diagrammi di carico alle singole utenze. Sorge subito un problema: come si caratterizza il carico negli schemi a blocchi? Quali sono e come si chiamano i segnali con cui lo stesso carico interagisce con l'esterno?

Le risposte a queste domande si troveranno nella libreria generale del software. Infatti cercando nella cartella chiamata "Build In" si troveranno le schede dei blocchi di tutti i componenti elettrici presenti in DIgSilent come è mostrato nella Fig.36. Dall'elenco bisognerà selezionare con un singolo click del tasto sinistro del mouse la voce "ElmLod". Successivamente, con un click del tasto destro comparirà un menù attivo dal quale si dovrà selezionare la prima voce "Edit", avendo così l'accesso alla scheda

descrittiva del blocco; alla voce "Input Signals" si troveranno i nomi dei due segnali con cui il blocco è collegato con l'esterno, rispettivamente Pext e Qext.

D	DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : rete bt base\\rete bt base]	
	🌄 Data Manager - \Library\Models\Build-in\ElmLod :	
1	🔁 🔁 🎽 🗶 🕸 🛍 🖻 🛃 🏶 60 🕍 🚣 📶 🛤 🗛 🛃 😂 🖬	
ê	Database     Name     Type	
	D00 Composite Model Frames     D00 DPL commands     D00 DPL commands     D00 General Composite Folder     D00 Induction Machines     D000 Induction Machines     D000 Build-in     ElmAsmo     ElmAsmo     ElmAsmo     ElmAsmo     ElmAsmo     ElmChar2	
	ElimSystem ElimSym ElimSym ElimSymo ElimSy	
	Ln 1 0 object(s) of 0 0 object(s) selected Drag & Drap	

Fig.100: Dettaglio elenco frame inclusi in DIgSilent

A questo punto si è in grado di costruire un frame contenente lo schema a blocchi desiderato e che apparirà come in Fig.37.

In tale frame compaiono altri due frame e non due blocchi di cui uno ospiterà il file testo con le potenze mentre il secondo ospiterà il carico.

	ile I	Edit	C	alcu	lati	on	D	ata	3	ΟL	Jtp	ut	- 1	Op	otic	on:	5	W	inc	lov	٧	Н	lelp	2																		
5	¥66	(	a	đ	1	3	l	Ŧ	•	Ŧ		ţ		ł	Ł	1	Ð					~	- I		Į	N	F		1	Ð		0		G	5		Q		晴			1
2	2	) *	q		] [1	09	%		-	8	3	E		ž	7	\$	Ð		2	;	1	4	-	Σ	2	Ι	Ľ	2	Ş	에			τŻ.	1	×		X		ß	2	l	1
çario	opA;	•																														• •										
																																										-
11	11		::	11	÷	: :	÷	1		1	÷	2	2		1	1	÷	÷	1	1		: :		1	1	÷	÷	÷	ŝ	÷	1	1	: :	1	1	÷	1		1	1	Ĵ	
1					÷					÷	÷							÷									÷	÷	÷			•			-	÷	·					
			::	1	÷	: :	:	1		1	÷	:			: :			÷	1	2				1	1	Ĵ	÷	Ì	Ì	Ì	1	: :			1	1	÷			1	Ĵ	
					÷					÷																	÷										÷					
	11		11	11	÷	11	÷	1		1	÷	1	1		1	1	1	1	1	1		1		1	1	÷	÷	÷	÷	ĵ.	1	1	: :	1	1	1	÷		1	1	÷.	
11					÷		÷	÷		÷	÷	÷						÷	÷					-		÷	÷	÷	÷	÷	÷				÷	÷	÷			-		
1	: :		: :	÷Γ								1					÷	÷	1	1		: :		Γ										÷	1	÷	÷			1		
								÷			÷																						.			÷	÷					
1	11		: :	:	1	: :	÷	1		1	1		1			1	÷	1	1	1		1			1	1	÷	÷	÷	1	1	1	:11	1	1	1	1	1	1	1	1	
							Six	piter	101	÷	÷	┢		_		_	-	Print			_	_	_	-			÷	÷.	ÿ	ice.	÷				-	÷	÷					
1	1.1			1	1	11	÷	1		÷	1						1	1	1	1		1			1	÷	÷	÷	÷	1	1	1	:11	1	1	1	1	1	1	1	1	
11					1						1																						:				÷					
· ·	• •	•	• •	·			•				·	J	-		• •			-			•	•		ŀ		•	•	•	•		•		ĿIJ			•	÷	•	• •			
11	11			17														1	1			1													1	÷	÷					
· ·	• •		• •	• •	÷	• •	÷				÷																÷	÷	÷	÷	÷	•	• •			÷	÷					
11	1.1		11	11	1	11		1		1	÷	2	2					1	1	1		1		1		÷	÷	÷	÷	1	1	1	: :		1	1	1			1	1	
·	• •	•	• •	• •	÷	• •	÷	÷		÷	·	•	•		• •			÷	÷	·	•	•				•	·	·	·	·	·	•	• •			÷	·	•	• •			
11	11		11	11	1	11	÷	1		1	÷	1	2					1	1	1		1		1	1	÷	÷	Ĵ	Ĵ	ĵ.	1	1		1	1	1	÷		1	1	÷	
·	· ·		• •	• •	÷	• •	÷				÷				•			÷									÷	÷	÷	÷	÷	•	• •			÷	÷		•			
	1.1		11	11	1	11	÷	1		1	÷	1	2		1		1	1	1	1		1	1	1	1	÷	÷	Ĵ	Ĵ	÷	1	1	: :	1	1	1	1		1	1	Ĵ	
·																											·										÷					
11	11		: :	: :	÷	: :	÷	1		÷	÷	2	2				÷	1	1	1		: :		1	1	÷	÷	÷	Ì	÷	1	1	: :		1	÷	÷			1	Ĵ	
11					÷		÷			÷	÷							÷									÷	÷	÷						-	÷						

Fig.101: Dettaglio frame

Il primo blocco avrà una scheda come in Fig.38, dove si può notare che nella sezione "Variables" soltanto la sezione "Outputs" è stata riempita con un solo segnale. Il nome che è stato dato a questo segnale, "y1", non è casuale, ma è tale per cui il software capisce che quel blocco non ha bisogno di un ingresso pur avendo una sola uscita.

	JSILENT PowerFa	actory 13.1 - [Graphic : Library\Folder1\carico	A\Graphic]
	Slot - Library\Fo	lder1\caricoA\Slot potenze.BlkSlot	×
	Name	Slot potenze	ОК
<b>ê</b> n	Sequence	0.	Cancel
, çari	Block Definition	<b>▼ →</b>	- Cancer .
E E	Filter for		:
: :	Class Name	×	:
: :	Model Name	×	
	Classification—		
: :	🔽 Linear		:
: :	🔲 Automatic, i	model will be created	:
	🔽 Local, mode	el must be stored inside	:
	Upper Limitation	)	÷
	Limiting Input S	ignals	:
	lower Limitation		÷
: :	Limiting Input S	ignais	:
: :	_ Variables		
: :	Output Signals	y1	
: :	Input Signals		
i Li			
		se ( Project I ) caricoA/	

Fig.102: Dettaglio scheda del blocco Measurement File

Una precisazione va ancora fatta su questo blocco, in quanto esso può arrivare a fornire fino a dieci uscite. Naturalmente, in tale caso il file di testo dal quale attingere i dati dovrà contenere undici colonne (una per l'ascissa e dieci per le dieci grandezze in ordinata). In quest'ultimo caso, nel campo "Output" saranno presenti dieci segnali, denominati y1,y2,...,y10.

Il secondo frame avrà una scheda simile alla precedente, solo che il campo "Output" sarà questa volta vuoto, mentre nel campo "Input" sarà presente il segnale Pext.

La descrizione dello schema a blocchi è finita qui, non c'è di bisogno di introdurre alcuna funzione di trasferimento e sarà possibile passare alla creazione e definizione del Composite Model. Anche in questo frangente viene fuori una differenza rispetto alla programmazione DSL esposta nell'apposito capitolo in quanto la definizione del Composite Model non richiede la definizione del Common Model proprio perché mancano i blocchi elementari con le loro funzioni di trasferimento.

Creato il Composite Model, bisognerà precisare quale sia il frame a cui puntare nell'apposito campo (vedi Fig.39).

Nel campo sottostante, "Slot Definition" comparirà l'elenco degli slot presenti nel frame selezionato (due per l'appunto) a cui si dovranno associare degli oggetti.

	IgSI	LENT Pov Pata Mar	werFactory nager - \nin	13.1 - [Gr	aphic : Lil	orary\Folder) base\Base +	l\caricoA\Gr Gendis\Com	aphic] posite N	Model Loa	d A :	
뿉	£	Compos	ite Model -	rete bt ba	ase\\Co	mposite Mod	lel Load A.Ein	nComp		×	1
<b>a</b> r		Basic D	ata Descrip	ition						ОК	$\vdash$
, ça		Name	0	Composite M	lodel Load	A					H
ŀΓ		Frame		✓ → Libra	ary\Folder1	\caricoA					
:		🗌 Ou	t of Service								
ŀ		Slot De	efinition:								
ŀ				Slots BlkSlot		Net I Elm*,S	Elements ita*,IntRef				
:		▶1	Slot potenze	;		P-Domus A		-			
ŀ		2	Slot carico			Carico A		-			
:											
ŀ											
:											
ŀ			 								
:				1							
:			Slot Update	•		Step R	esponse Test				
ŀ				l ine 5.8							_
:		.n 1 0	) object(s) of	0	0 objecti	(s) selected	Drag & Dro	P			
		► rete	bt base / F	Project1 <b>∖ c</b>	aricoA/						

Fig.103: Dettaglio scheda del Composite Model

Ad uno slot verrà associato il Measurement File creato precedentemente e presente nella griglia attiva, mentre al rimanente slot verrà associato un carico. Si è conclusa così la fase di definizione del Composite Model per cui si potrà dare l'OK.

Se si dovesse provare adesso a lanciare una RMS Simulation si otterrebbe un risultato poco soddisfacente, come in Fig.40.



Fig.104: Dettaglio potenza in ingresso ed in uscita dal carico

Nel grafico inferiore è mostrato l'andamento, per i primi 20s, delle potenze lette dal file testo e che dovrebbero essere quelle potenze che il carico dovrebbe richiedere alla rete. Il grafico superiore invece rivela che il carico assorbe dalla rete una potenza costante ed è ciò che non è soddisfacente.

Per sistemare le cose bisognerà lavorare sulle specifiche del carico interessato nella maniera seguente. Selezionare il carico con un doppio click per entrare nella sua scheda ed andare direttamente alla cartella "Load Flow" come mostrato in Fig.41.

DI	IgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : rete bt base\\rete bt base]	
	General Load - rete bt base\\Carico A.ElmLod	×
	RMS-Simulation         EMT-Simulation         Harmonics         Optimization         Reliability         Description           Basic Data         Load Flow         VDE/IEC Short-Circuit         Full Short-Circuit         ANSI Short-Circuit	ОК
<b>e</b>	Input Mode	
	Balanced/Unbalanced	Figure >>
	Operating Point	Jump to
	Total Active Power Load 1. kW	
1::	Total Reactive Power Load 1. kvar	
	Voltage 1. p.u.	
	Scaling Factor 1.	
::	Adjusted by Load Scaling	:

Fig.105: Dettaglio scheda del carico

Nel campo "Input Mode" bisognerà selezionare la voce "default", nel campo "Balanced…" bisognerà scegliere "Balanced" poiché le nostre tipologie di carico sono tali. Nella sezione sottostante "Operating Point", solo il campo "voltage" necessita di essere impostato ad uno in maniera tale da riferire la tensione di alimentazione del carico alla tensione del nodo (la quale tensione si cercherà di mantenere nell'intorno di un più o meno 4% attorno a 400 V), gli altri campi non hanno alcuna importanza in questa modalità di funzionamento. Adesso si dovrà ritornare alla cartella "Basic Data" e selezionare il tasto 🖃 in corrispondenza della voce "Type" al fine di accedere alla scheda del tipo del carico ed andare ad aprire la cartella "Load Flow" come in Fig.42.



Fig.106: Dettaglio delle proprietà del carico

Impostando i campi come in Fig.42 si vuole specificare che il carico è a potenza assegnata secondo la descrizione dei modelli ZIP. Successivamente si dovrà passare alla cartella RMS-Simulation della stessa scheda che apparirà come in Fig.43.

DMC	General Load Type - Library\Gene	ral Load Txne	(5).TypLod		
Basi	Ratio Data L Load Flow L VDE/IE	C Short-Circuit	Eull Short-Ciro	ANSI Short C	irouit I
	BMS-Simulation EMT-Simulation	Harmonics	Optimization	Beliability Descri	iption OK
Nar	- Percentare				Cance
Тур	Chatic (count 7)	,			
Ten	Static (const 2)	~			
	Dynamic  100	%	Monlinear Mo	odel	
	Durania Land Time Constant	0.1			
Tec	Dynamic Load Time Constant	10.1	s		
	Dynamic Active Load	-			
	Frequ. Dependence on P	JU.	_		
	Volt. Dependence on P	1.			
	Transient Frequency Dependence	0.	\$		
	Transient Voltage Dependence	0.	\$		
	Dynamic Reactive Load				
	Frequ. Dependence on Q	0.			
	Volt. Dependence on Q	0.			
	Transient Frequency Dependence	0			
		0.	`		
	I ransient Voltage Dependence	JU.	s		
	Voltage Limits				
	Upper Voltage Limit	1.2	p.u.		
	Laward (allowed Limit	0.0			

Fig. 107: Dettaglio della cartella RMS Simulation del carico

In tale finestra, per default il software imposta un carico statico al 100%, mentre per gli scopi che ci si prefigge il carico deve essere totalmente dinamico, per cui bisognerà introdurre il dato nel campo "Dynamic", dopo di che si potrà dare l' Ok a tutte le finestre perché si è terminata la definizione del carico. Lanciando adesso la stessa simulazione di prima si otterrà il risultato come in Fig.44.

Si può notare adesso che quanto viene letto nel file testo è quello che il carico richiede alla rete.

La stessa procedura verrà applicata alle utenze industriali con la sola differenza, rispetto al caso delle utenze domestiche, che non bisogna intervenire sulla scheda delle singole utenze, ovvero introdotto il componente nella rete e definito il suo tipo bisognerà solo introdurlo nello slot del Composite Model ed il lavoro sarà terminato.



Fig.108: Dettaglio delle potenze in ingresso ed in uscita dal carico

#### Paragrafo 3.5: L'impianto di generazione eolica

Il prossimo passo sarà quello dell'introduzione della generazione distribuita costituita, inizialmente, da una coppia di generatori eolici con una potenza di 35 kW ciascuno e direttamente allacciati alla rete BT. L'allacciamento alla rete non vede l'interposizione di trasformatori perché i generatori asincroni che equipaggiano gli impianti eolici forniscono la loro potenza ad una tensione di 400 V.

Il principio di funzionamento di questi generatori eolici è lo stesso visto nel capitolo "progetto di un generatore eolico", per cui si adotteranno gli stessi schemi a blocchi apportando però le dovute modifiche alla turbina eolica, che ovviamente avrà dimensioni e prestazioni ridotte, ed al generatore asincrono.

I dati per la progettazione della nuova turbina eolica sono stati attinti da un progetto eseguito dall' ENEL in collaborazione con la FIAT ([C,P-1976]).

## Paragrafo 3.6: L'influenza della generazione distribuita sulla rete BT

Il primo aspetto che verrà passato in rassegna sarà la potenza assorbita dalla rete nel nodo di collegamento MT/BT in assenza generazione distribuita. La simulazione interesserà l'arco di una intera giornata. L'andamento riportato in Fig.45 rappresenta la potenza attiva, mentre l'andamento riportato in Fig.46 rappresenta la potenza reattiva.



Figura 109: Andamento potenza attiva attraverso la stazione MT/BT



Fig.110: Andamento della potenza reattiva attraverso la stazione MT/BT

Successivamente si eseguirà la stessa simulazione posizionando gli impianti di generazione distribuita ai nodi di puro carico 10 e 14.

Nelle Fig.47 e Fig.48 sono riportati rispettivamente gli andamenti della potenza attiva e reattiva assorbite dalla rete.



Fig.111: Andamento della potenza attiva



Fig.112: Andamento della potenza reattiva

Posizionando la generazione distribuita ai nodi 6 e 9 si otterranno, per la potenza attiva l'andamento riportato in Fig.49 mentre per la potenza reattiva l'andamento riportato nella Fig.50.



Fig.113: Andamento potenze attive



Figura 114: Andamento delle potenze reattive

Nella successiva simulazione i generatori eolici verranno posizionati ai nodi 3 e 5. Nella Fig.51 e nella Fig.52 vengono rappresentate rispettivamente le potenze attive e reattive scambiate con la rete MT attraverso la stazione.



Fig.115: Andamento delle potenze attive



Fig.116: Andamento delle potenze reattive

L'ultima simulazione vedrà l'installazione della generazione distribuita nei nodi immediatamente a valle della stazione MT/BT. Nella Fig.53 è riportato l'andamento delle potenze attive.



Fig.117: Andamento delle potenze attive



Nella Fig.54 è riportato l'andamento delle potenze reattive.

Fig.118: Andamento delle potenze reattive

Dalla precedente esposizione può essere notata una grossa differenza, negli andamenti delle potenze attive, passando dal caso di assenza di generazione distribuita al caso con generazione distribuita. La stessa cosa non potrà dirsi per i diversi andamenti, sempre delle potenze attive, ottenuti spostando semplicemente gli impianti eolici da valle verso monte. Tuttavia bisogna anche dire che esiste, con l'impiego della generazione distribuita un flusso di potenza attiva verso la rete MT. Per quanto riguarda invece l'assorbimento di potenza reattiva, si può dire che non rispecchia lo stesso beneficio mostrato dalle potenze attive in quanto le macchine asincrone che equipaggiano i generatori eolici hanno una richiesta di potenza reattiva che non può provenire che dalla rete esterna.

L'installazione di impianti di generazione distribuita sulle reti MT e BT influisce su molti aspetti riguardanti la loro gestione ed il loro esercizio. Tra questi aspetti si trova il profilo della tensione.

La presenza della generazione distribuita porta ad un innalzamento di tale profilo di tensione proprio perché vi è una iniezione di potenza attiva ed eventualmente di potenza reattiva.

Queste variazioni di tensione dipendono anche da fattori quali per esempio la posizione della stessa generazione distribuita lungo la linea.

Per condurre tale analisi si sfrutterà uno strumento grafico fornito da DIgSilent che permette di fornire l'andamento della tensione lungo un determinato "Feeder". Partendo dalla rete originale verrà isolato un determinato percorso, che includa anche la generazione distribuita, che parte dal nodo di allacciamento alla rete esterna ed arrivi ad un carico. Il tratto di rete che si è deciso di isolare è quello che partendo dal bus 0 alimenta direttamente il carico A; tutti gli altri rami saranno aperti ad un capo.

Per accedere al grafico "Voltage Profile" bisogna lanciare prima una simulazione di Load Flow selezionando il tasto IP posto nella barra degli strumenti di DIgSilent. Successivamente si dovrà selezionare un "cubicle", ovvero uno di quegli oggetti che nello schema uniflare ospitano gli switch, con un singolo click del tasto destro del mouse facendo così apparire un menù attivo.

Da tale menù bisognerà scegliere la voce "Define" che si troverà nella parte bassa dello stesso come mostrato in Fig.45. Selezionando adesso la voce "Feeder…" si sarà definito come tale tutto il percorso a valle del "cubiche" selezionato fino al carico A.



Fig.119: Dettaglio menù definizione profilo di tensione

Questo nuovo feeder sarà disponibile nella cartella omonima presente nel progetto come mostrato in Fig.46.



Fig.120: Dettaglio elenco feeders disponibili

A questo punto si dovrà creare la pagina grafica e la procedura sarà la stessa vista per i grafici usuali. Lanciata la simulazione di Load Flow, si dovrà cercare il feeder interessato come in Fig.46, selezionarlo sul suo simbolo en con un click del tasto destro attivando così un menù dal quale bisognerà scegliere la voce "Show" e successivamente "Voltage Profile".

Si effettuerà tale procedura per ognuno degli Study Case presenti nel progetto ottenendo i risultati mostrati nel seguito a partire dal caso di generazione distribuita vicino al carico. In particolare, la Fig.57 mostra l'andamento della tensione ai nodi nel caso in cui non ci sia generazione distribuita nella rete.



Fig.121: Profilo di tensione senza generazione distribuita

Nella Fig.58 è riportato l'andamento della tensione ai nodi nel caso in cui il generatore eolico venga allacciato al nodo 10 della rete Bt.



Fig.122: Profilo di tensione con generatore eolico al nodo 10

Nella Fig.59 è riportato l'andamento della tensione ai nodi nel caso in cui il generatore eolico venga allacciato al nodo 6 della rete in Bassa Tensione.



Fig.123: Profilo di tensione con il generatore eolico al nodo 6

Nella Fig.60 è riportato l'andamento della tensione ai nodi nel caso in cui il generatore eolico venga allacciato al nodo 3 della rete Bt.



Fig.124: Profilo di tensione con generatore eolico al nodo 3

Ed infine nella Fig.61 viene riportato il profilo di tensione nel caso in cui la generazione distribuita venga allacciata al nodo 1.



Fig.125: Profilo di tensione con generazione distribuita al nodo 1

# Paragrafo 3.7: Ancora sui grafici di DIgSilent

Il software DIgSilent fornisce un altro strumento per la rappresentazione grafica, costituito dalla possibilità di trasformare i grafici ottenuti da una RMS Simulation in file di altro tipo.

Nel caso in cui si volesse salvare un disegno oppure un grafico presente nella sezione "Graphic Window" basterà selezionarlo con un singolo click del tasto sinistro del mouse dopo di che si dovrà selezionare la voce "File" presente nella barra degli strumenti superiore di DIgSilent. Verrà fuori un menù attivo come mostrato in Fig.61. Da tale menù attivo si dovrà selezionare la voce "Export..." semplicemente trascinandovi sopra il cursore ed attivando così un secondo menù attivo (vedi Fig.62). Dal secondo menù attivo bisognerà selezionare la voce "Windows Bitmap"; comparirà una nuova finestra



Fig.126: Dettaglio del menù attivo

Dal secondo menù attivo bisognerà selezionare la voce "Windows Bitmap"; comparirà una nuova finestra di dialogo, come in Fig.63, in cui bisognerà introdurre la cartella di destinazione del file e soprattutto il nome.

DIgSILENT PowerFactory 13.1 File Edit Calculation Data O	- [Graphic : rete bt base\\rete bt base] utput Options Window Help
	• • • • • • • • • • • •
🐴 🔎 🎾 🗌 100% 🔽 🤞	∋ = 2 2 1° ≈ 1° × Σ = 2 3 1° ×
Salva con nome	<u>اي :</u> • • • • •
Documenti     Risorse del computer     Risorse di rete     FAQ     Generale     Generale     Generale	Cigrafici caso finale Cin Nuova cartella IIII andamenti finali Sir Collegamento a Disco locale (C) IIIII grafici IIIII tardi
Nome file: Salva come: Windows Bitmap	(*.bmp) Annulla

Fig.127: Dettaglio scelta formato immagine

Una seconda modalità per eseguire l'export dei grafici, e forse più interessante, verrà riportata a seguire. Una volta eseguita la RMS Simulation bisognerà riportatre su di un foglio grafico una determinata grandezza, come per esempio quella riportata nella Fig.64.



Fig.128: Dettaglio pagina grafica

A questo punto bisognerà selezionare l'area del grafico con un singolo click del tasto destro del mouse attivando così un menù, come mostrato in Fig.65.



Fig.129: Dettaglio della funzione export

Da questo menù attivo dovrà essere scelta la voce "Export" con un click del tasto destro del mouse facendo aprire così la finestra di dialogo come in Fig.66.

	IgSILENT PowerFac	tory 13.1 - [Graphic t dis tipo A\ASC	: : Rete base + Gendis t II Result Export.ComRe	ipo A\Graphics Bo	ard\Project:
*	res/file/tsel/csel/hs	h		Execute	1 I I I I I I I I I I I I I I I I I I I
<mark>ک</mark>	Result Object	💌 🔸 + Gendis t	ipo AVAII calculations	Close	
20	Result Object Info Time Interval: Step Size: Points of time: No of Variables:	-0.100000 s 86399. 0.010000 s 8640012 3	993262 s	Cancel Apply	
-20.	Export to File Name	Textfile C:\Documents and S	ettings\Ninox\Desktop\P_(	Caso	
-40. -80.	Interval Step Size ( n* ) ✓ User Defined In from -0.1 to 86339.39 ->File	100 nterval s s	Columns (Variables) User Defined Columns 1-2 Header Short Descrip Output of Name in He	otion 💌	

Fig.130: Dettaglio della scheda descrittiva della funzione Export

Tesi di Laurea

Maggio 2007

La parte più intuitiva di tale finestra è quella denominata "Interval" nella quale vengono riportati gli estremi dell'intervallo, nel dominio del tempo, che è oggetto di interesse e come si vede possono essere incluse anche le condizioni iniziali. Nel campo denominato "Step Size" deve essere introdotto il passo di campionamento del suddetto intervallo di tempo. Se si scegliesse di mettere un valore unitario allora ne risulterebbe un intervallo campionato al millisecondo, se invece si decidesse di mettere 100 significherebbe che il passo sarebbe di 100 ms ovvero 0.1 s. La differenza che passa tra le due modalità sopra enunciate sta nella dimensione del file risultante (per esempio per un intervallo di circa 80000 valori il file testo varia la sua dimensione da qualche MB a qualche centinaio di MB). Nella parte denominata "Columns (Variables)" compaiono dei numeri, in questo caso sono due, che hanno un duplice significato. In primo luogo identificano il numero di colonne che verranno stampate nel file testo. In secondo luogo, se in una simulazione si sono raccolti dati per dieci grandezze allora il software assegna ad ognuna di queste un numero da 2 a 11 poiché il numero 1 è riservato sempre alla colonna tempo. Quindi volendo utilizzare tale funzione di export bisognerà sapere quale numero è stato associato alla nostra grandezza e riportarlo nel campo bianco, senza nessun altro numero qualora si volesse ottenere un file con una sola colonna altrimenti nello stesso campo si riporteranno i codici di tutte le grandezze che si vorranno separate o dal trattino oppure dalla virgola.

Nel sottostante campo denominato "Header" viene offerta la possibilità di inserire informazioni su ogni colonna scegliendo come riportato in Fig.67.

	IgSILENT PowerFac	tory 13.1 - [Graphic	c : Rete base + Geno TI Result Export Cor	lis tipo A\Graphics Bo	ard\Project1]
*	res/file/tsel/csel/hs	h		Execute	<b>9</b> 🖽 🛛
2	Result Object	► ► + Gendis	tipo AVAII calculations	Close	↓ <u>0 5</u> <u>∓</u>
20.	Result Object Info Time Interval: Step Size: Points of time: No of Variables:	-0.100000 s 86395 0.010000 s 8640012 3	9.993262 s	Cancel Apply	
-201	Export to File Name	Textfile	Settings\Ninox\Desktop	\P_caso	
-401	Interval Step Size ( n* ) Ver Defined In from -0.1 to 86399.99 ->File	100 nterval s s	Columns (Variables User Defined Columns 1-2 Header Short De Output Short Des Full Des	scription	A

Figura 131: Dettaglio della scheda di export

A questo punto si rivolgerà l'attenzione al campo denominato "Export to" dove sarà possibile scegliere il tipo di file destinazione di tutti i dati come indicato nella Fig68.

	D	IgSILENT PowerFac	tory 13.1 - [Graphic	: Rete base + Gend	is tipo A\Graphics Bo	ard\Project
	<b>*</b> 2	res/file/tsel/csel/hsł	1 uis cipo A (ASC)	II RESUL EXPORTATION	Execute	<b>1</b>
	2	Result Object	▼ → + Gendis ti	ipo AVAII calculations	Close	
	20.	Result Object Info- Time Interval: Step Size: Points of time: No of Variables:	-0.100000 s 86399. 0.010000 s 8640012 3	993262 s	Cancel Apply	
	-201	Export to File Name	Textfile Output Window Windows Clipboard Measurement File (El Comtrade Textfile	▼ mFile)	VP_caso	
ŀ	-401 -001	Interval Step Size (n*) [ ✓ User Defined In from -0.1 to 86399.99 ->File	100 terval s s	Columns (Variables) User Defined Columns 1-2 Header Short Defined	scription	
ſ	=					

Figura 132: Dettaglio della scheda della funzione export

La prima voce dell'elenco, "Output Window" permette di visualizzare i dati nell'omonima sezione di DIgSilent. La seconda voce "Windows Clipboard" rende disponibili i dati per l'operazione di copia incolla. La terza voce "Measurement File" crea un file testo pronto per il successivo utilizzo nello stesso DIgSilent (si ricordi la procedura per l'introduzione delle velocità del vento oppure ancora dei carichi). La quarta voce invece, "Textfile", permette di generare un semplice file testo.

Selezionando, a questo punto, il tasto "Execute" si creerà il file scelto nella directory desiderata.

**Paragrafo3.8**: Le prove di corto circuito sulla rete di bassa tensione

La prima prova che si intende realizzare è la simulazione di un corto circuito trifase in un nodo di puro carico che viene interrotto dalle protezioni di macchina. Nella Fig.68 è riportato l'andamento della corrente di guasto in assenza di generazione distribuita.



Fig.133: Corrente di guasto attraverso la linea

Nella successiva Fig.70 è riportato l'andamento della corrente di guasto in presenza di due impianti di generazione distribuita.



Fig.134: Andamento della corrente di guasto attraverso la linea

La differenza tra i due precedenti grafici è veramente piccola e la si può notare soltanto nei primissimi picchi della corrente di guasto in Fig.69. Tale differenza può essere incrementata incrementando la potenza degli impianti di generazione distribuita come mostrato nella Fig.71.



Fig.135: Andamento della corrente di guasto in linea

Per ottenere quest'ultimo risultato, la potenza degli impianti di generazione distribuita è stata addirittura triplicata a giudicare la lieve influenza di questi impianti sulle correnti di corto circuito delle reti in Bassa tensione.

# **CAPITOLO 4**

# LO STATO DELL'ARTE DEL CORTO CIRCUITO NELLE RETI AD ALTA TENSIONE

# **<u>Paragrafo 4.1</u>**: La definizione della rete ad alta tensione

La rete ad alta tensione che viene presa in considerazione in questa sede ha le seguenti caratteristiche. Nella Tab.1 sono riportate le caratteristiche dei nodi, nella Tab.2 ci sono le caratteristiche dei carichi, nella Tab.3 ci sono le caratteristiche dei generatori elettrici mentre nella Tab.4 ci sono le caratteristiche dei carichi.

Tab. 4:	Caratteristiche	dei	nodi

Nodo	Tensione Nominale [kV]
1	225
2	225
3	225
4	225
5	225
6	225
7	225
8	225
9	225
10	225

Tab.5: Caratteristiche dei generatori

generatori					
nodo	Qg [Mvar]				
1	0	0			
2	306	229,5			
3	194	145,5			
5	212	159			
7	174	130,5			

Tab. 6: Caratteristica dei carichi

	carichi	
nodo	P [MW]	Q [Mvar]
2	250	150
4	100	63
6	100	35
7	100	30
8	150	75
9	250	150
10	100	50

Tab. 7: Caratteristiche delle linee elettriche

		linee				
nodi	L [km]	R [ohm/km]	X [ohm/km]			
1-3	94,655	0,0528	0,2589			
1-4	66,766	0,0749	0,367			
3-4	147,066	0,0408	0,2696			
3-9	101,186	0,0568	0,2767			
2-3	151,292	0,1507	0,4138			
4-9	188,329	0,1312	0,515			
4-6	67,103	0,0559	0,3688			
4-10	134,431	0,0614	0,2455			
4-5	60,465	0,03307	0,16535			
8-9	188,329	0,1312	0,515			
6-8	107,829	0,088	0,295			
7-8	147,066	0,0408	0,2686			

A questa configurazione iniziale sono state apportate delle modifiche. La prima modifica è stata l'introduzione di due motori asincroni, funzionanti secondo la loro caratteristica coppia-velocità, che vengono però allacciati alla rete a mezzo di due cabine.

La seconda modifica ha toccato quelle linee (sono la 3-9,4-9 e la 8-9) che, a seguito di una simulazione di Load Flow, presentavano una caduta di tensione relativa percentuale superiore alla soglia limite del 4%. La soluzione è stata trovata passando dalla configurazione a linea singola a quella con tre linee in parallelo e successivamente rilanciando la simulazione di load flow si noterà come adesso tutte le linee rispettano il vincolo sulla caduta di tensione percentuale. La terza modifica ha riguardato l'introduzione di due windfarm allo scopo di verificare quale fosse l'influenza delle risorse distribuite sulle correnti di corto circuito e soprattutto sulla stabilità della stessa rete. I due impianti di generazione eolica hanno una taglia di 37500 MVA ciascuno e sono costituiti da dieci turbine eoliche collegate a delle macchine asincrone funzionanti come generatori. Per la progettazione di ciascuno di questi generatori eolici si è fatto riferimento ad un modello realizzato dalla VESTAS della potenza di 3MW e con una tensione nominale di 1kV. Per potere allacciare queste due windfarm alla rete si sono rese necessarie due stazioni di trasformazione AT/MT, per portare la tensione da 225 kV a 22 kV,ed MT/BT che portano la tensione da 22 kV ad 1 kV. La nuova rete così modificata si presenta come nella Fig.1.



Fig.136: Schema unifilare della rete AT

## Paragrafo 4.2: Il calcolo del corto-circuito con DIgSilent

Tale studio viene condotto lanciando una simulazione di load flow con l'ipotesi della presenza di un guasto in rete. Il software DIgSilent fornisce la possibilità di eseguire tale studio seguendo diverse norme ma in tale contesto si è scelto di usare la norma internazionale IEC 60909.

In questo paragrafo saranno passate prima in rassegna le modalità di esecuzione dello studio di corto circuito e solo successivamente verranno presentate le prove eseguite sulla rete AT. DIgSilent permette di simulare guasti singoli come anche quelli multipli ai nodi come alle linee, ma cominciamo con il guasto singolo ad un nodo. Bisogna inizialmente selezionare il nodo interessato con in singolo click del tasto destro del mouse, a seguito comparirà un menù attivo dal quale verrà scelta la voce "Calculate..." che aprirà un nuovo menù attivo dal quale si dovrà scegliere la voce "Short-Circuit..." come si può vedere dalla Fig.2.



Fig. 137: Dettaglio menù di calcolo corto\_circuito

Verrà fuori la finestra di dialogo del corto-circuito, come in Fig.3, dove alla voce "Method" bisognerà scegliere le modalità con le quali studiare il corto-circuito stesso dalla lista che comparirà selezionando il tasto 🗐 sul lato destro dello stesso campo.

DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : Grid\Grid]	
Short-Circuit Calculation - Study Case\Short-Circuit Calculation.ComShc	×
Table Continues Advanced Options Verification	Execute
ar shc/full/3psc/asc	
Method       complete       Select 'complete' method to calculate multiple faults.         Fault Type       3-Phase Short-Circuit       Multiple Faults         Load Flow       Study Case\Load Flow Calculation       Multiple Faults         Fault Impedance       Short-Circuit Duration       Breaker Time       0.1         Resistance, Rf       0.       Ohm       Breaker Time       0.1       s         Output       Image: Command Short Calculation       Study Case\Dutput of Results       Shows       Fault Locations with Feeders         Fault Location       At all Busbars and Terminals       User Selection       Image: Circlewindfarm 2	Close

Fig.138: Dettaglio della scheda del corto-circuito

Al successivo campo denominato "Fault Type" bisognerà selezionare il tipo di guasto che si vuole simulare. Nella sezione "Fault Impedance" come si può notare è impostato un valore di impedenza di guasto nulla (guasto franco) ma il valore può essere impostato arbitrariamente, come pure può essere fatto per la durata del guasto nella corrispondente sezione alla destra. Le due sezioni sottostanti sono di minore importanza in quanto la prima riguarda la scelta di avere disponibili i dati della simulazione nella "Output Windows" di DIgSilent, mentre la seconda riguarda la scelta della localizzazione del guasto cosa che è stata fatta inizialmente.

Premendo dunque il tasto di "Execute" si darà il via alla simulazione di load flow alla fine della quale nello schema unifilare tutti i box conterranno i rispettivi dati della simulazione, mentre il nodo interessato dal guasto sarà riconoscibile perché marchiato con il simbolo 🛃.

Allo stesso risultato è possibile giungere selezionando il tasto **[**] presente nella barra degli strumenti di DIgSilent con la differenza, rispetto alla procedura precedente, che adesso bisognerà selezionare nella sezione "Fault Location" il nodo che si vuole sia

Verrà fuori una finestra di dialogo, come in Fig.4, del Data Manager che invita alla scelta del nodo.

DI	gSIL	ENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : G	rid\Grid]						
<b>_</b> s	ihort	-Circuit Calculation - Study Case\She	ort-Circui	t Calculation.ComShc		×			
	Ba pl	lease Select Object - \nino\Rete AT\	Grid :					[	×
æ	1	🗈 🖻 🎽 🗙 🌡 🖻 🛍	🛃 🎭	60 🕍 🏤 🖆 🕯	4 🖻 🖬			ОК	٦Ē
· .	N			Name	Туре	Out of Service			
8	E	Generatore fotovoltaic	٠ ٢	GS 5	Synchronous Machin		<b>_</b>	Lancel	_  °1
		🕀 🖾 IEEE 13 Node Test Fe	٠ ۵	GS 7	Synchronous Machin	ī		Filter	
· ·	L	🗄 🖾 LOAD_Measurement	+-	Bus GS2	-			Filler	
			+-	Bus GS3					
S			+-	Bus GS5		Γ			
	Γ		+-	Bus GS7		Г			•
			+-	Bus MT					58
		⊕ @ PowerSwingTripping	+-	Bus Mt					3.
		E 🔁 Rete AT	+-	Bus mot 1					
20	-	🕀 🗮 🕀 🕀	+-	Bus mot 2		Г			0 1
24		🗄 🔂 Study Case	+-	Nodo 1					
		± 000 Library	+-	Nodo 10					
		E ize Changed Settings	+-	Nodo 2		Г			
		T B BeyPowerBelau	++	Nodo 3					2015
	L		► <del>+</del> - <	Nodo 4					
3- I	Г	🕀 🖾 Test DSL Event	+-	Nodo 5					
		🕀 🖾 UnderFrequ_UnderVo	+-	Nodo 6					
~		E @ WIND_ExampleAsm	+-	Nodo 7					
24		eolico doubly fed	+-	Nodo 8					H
	-		· -+ v	Nodo 9					
1 e -			+-	Wind Farm					
		E G lezione 1 & 2 Pasini	+-	windfarm 2					
			me	тр	2) Unding Transform				
8	1		I						
		Ln 60 80 object(s) of 80 1	object(s) s	elected					11
1	_						· · · · · ·	<u>f</u>	· · ·
· -		-145 -005 -4.15 -345		0.12	0.17 -1.11		· · · · · ·	15 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · ·

Fig.139: Dettaglio elenco componenti elettrici

In tale nuova finestra si dovrà selezionare prima la griglia attiva con un singolo click e ciò darà l'accesso ad una lista con tutti gli elementi presenti nella stessa griglia e dal quale bisognerà scegliere il nodo interessato selezionandone il rispettivo simbolo con un singolo click.Fatto ciò sarà possibile lanciare la simulazione.

Se si volessero simulare più guasti occorrenti allo stesso istanti allora il software fornisce la funzione "Multiple Fault". Per prima cosa si dovrà creare una lista degli elementi che vengono interessati dal guasto e ciò è possibile selezionando il tasto **II** il quale apre una finestra di dialogo come nella seguente Fig.5.

DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : Grid\Grid] File Edit Calculation Data Output Options Window Help																			
2금 5	Short Circuits - \nino\Rete AT\Study Case\Short Circuits :																		28
	**	$\times$	H		l 🗹	🤹 (	60' ∳⊛		2	<b>#4</b> 🖬	° -						ОК	٦ŀ	
				Name		StaBa	Object ar*,ElmTe	erm*,	Out of	Service							ancel		
:																			8
																		ł	6
:																		-	10 (2
																		ŀ	Res
:																		ł	
:																		ľ	
	┝─										•							in in	e (4
· ∢   ·	L	ז 1	0 ob	ject(s) o	of O	1	object(:	s) selec	ted									11	(4-5
	· · ·	F				• • •		· ·	· · · ·					•	•	· ·			
		•	• •					· ·	• •			•					• •		1

Fig. 140: Dettaglio pagina definizione corto-circuiti

Per creare la lista si dovrà selezionare il tasto 🗈 il quale aprirà a sua volta una nuova finestra nella quale bisognerà scegliere la tipologia di guasto che si desidera simulare.



Fig.141: Dettaglio scelta evento corto-circuito
Selezionando OK si entrerà nella finestra descrittiva del guasto come mostrato in Fig.7.

Di Di	ig <b>SILEN</b> T	PowerFactory 13.1 Calculation Data C	- <b>[Graphic : Grid</b> Output Options	∖ <b>Grid]</b> Window	Help					-		
뿉	Short Ci	rcuits - \nino\Rete#	\T\Study Case\	Short Ci	rcuits							<u> </u>
	睝	Short-Circuit Event ·	\Short Circui	its\Shoi	t-Circ	uit Even	t.Evt	Shc		<u>کا</u> _	ĸ	1 H
면		Out of Service							ОК	٦Ë	K	4   1
1:	► uN								1	- Car	icel	
1									 ancei			
1:												
1												in the second
1:												
1:												
1		Object	▼ →									Ret
11		Fault Type	3-Phase Short-0	Circuit		-						
11												ine (d
11		Fault Resistance	0.	Ohm								
	Ln	Fault Reactance	0.	Ohm								111 -
				1 1					 _		· · · ·	· · · ·

Fig. 142: Dettaglio scheda descrittiva del corto-circuito

In tale finestra viene chiesto il componente elettrico interessato dal guasto che può essere introdotto selezionando il tasto 🔳 e poi dal menù attivo che sarà venuto fuori si selezionerà la voce "Select" che permetterà la scelta del componente direttamente dalla griglia attiva, come mostrato in Fig.8.

DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graph File Edit Calculation Data Output C Short Circuits - \nino\Rete AT\Study Short-Circuit Event \Sho Please Select 'StaBar*,ElmTerm*,ElmLu E 🕄 🎘 X 🌡 🛍 🛍	nic : Grid\Grid] Options Window Help y Case\Short Circuits : rt Circuits\Short-Circuit Ever ne,ElmLneroute** - \nino\Re 2 & & & & & & & & & & & & & & & & & & &	it.EvtShc 🗶 te AT\Grid :		
E - ₩ [Grid E III Grid E III Grid E E Composite Mr - ∠ Line (1-3) - ∠ Line (1-4) - ∠ Line (2-3) - ∠ Line (2-3) - ∠ Line (3-9) - ∠ Line (4-10) - ∠ Line (4-5) - ∠ Line (4-6) - ∠ Line (4-6) - ∠ Line (4-8) - ∠ Line (4-8) - ∠ Line (6-8) - ∠ Line (8-9) E Bus GS2 E Bus GS3 ▼	Name           ✓         Line (1-3)           ✓         Line (1-4)           ✓         Line (2-3)           ✓         Line (3-4)           ✓         Line (3-9)           ✓         Line (4-10)           ✓         Line (4-5)           ✓         Line (4-6)           ✓         Line (6-8)           ✓         Line (7-8)           ✓         Line (8-9)           ✓         Line (8-3)	Type     Out       Line Type(1)	of Service	
Ln 6 [32 object(s) of 80 [1 o	object(s) selected			

Fig.143: Dettaglio lista componenti elettrici

Scelto il componente si potrà dare l'OK per ritornare alla finestra descrittiva del guasto, dove nel campo "Fault Type" si dovrà scegliere il tipo di corto-circuito che si vuole simulare (vedi Fig.9).

DIgSILENT PowerFactory 13.	1 - [Graphic : Grid\Grid]		
Short Circuits - \nino\Rete	AT\Study Case\Short Circuits :		×
🙀 🎽 Short-Circuit Event	\Short Circuits\Short-Circuit Event.Ev	/tShc X	Ca
Out of Service     Out of Service		OK Cancel	OK Cancel
Object	<b>▼ →</b>		Re
Fault Type	3-Phase Short-Circuit		
Fault Resistance	3-Phase Short-Circuit 2-Phase Short-Circuit Single Phase to Ground Fault 2-Phase to Ground Fault Clear Short Circuit 1-Phase Neutral to Ground 2-Phase Neutral to Ground 2-Phase Neutral to Ground 2-Phase Neutral		Januaria Januaria Januaria Januaria Januaria
	3-Phase,Neutral to Ground 3-Phase to Neutral	·         ·	· · · · · · · ·

Fig.144: Dettaglio elenco tipologie di guasto

Eseguita questa scelta bisognerà decidere se il guasto ha impedenza nulla oppure no ed in quest'ultimo caso si dovranno introdurre i valori di resistenza e reattanza negli appositi campi. La lista degli eventi di guasto è stata completata in ogni sua parte per cui si potrà procedere oltre con la simulazione. Selezionando il tasto 🛙 si entrerà nella finestra di dialogo del calcolo del corto-circuito come in Fig.10.

DIg	SILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : Grid\Grid]	
B	art-Lircuit Laiculation - Study Lase\Short-Lircuit Laiculation.LomShc asic Options Advanced Options Verification	Execute
I	shc/full	Close
,	Vethod Select 'complete' method to calculate multiple faults. ↓ Multiple Faults	Cancel
L	Load Flow Study Case\Load Flow Calculation	
	Short-Circuit Duration	
	Breaker Time 0.1 s	
Γ	Output	
	J Un	
	Fault Location	
	Short-Circuits Study Case\Short Circuits	

Fig.145: Dettaglio scheda della simulazione del guasto

In tale finestra si noterà subito che l'opzione "Multiple Fault" è già selezionata, quindi l'unica cosa che resta da fare è di selezionare la lista dei guasti dalla sezione "Fault Location".

Selezionando OK si darà il via alla simulazione di load flow in condizioni di guasto.

Bisogna a questo punto fare una precisazione a riguardo delle linee, infatti se una linea elettrica è introdotta nella lista dei componenti elettrici soggetti a guasto multiplo, non è possibile posizionare il guasto in un qualsiasi punto lungo la linea ma soltanto nel punto mediano.

Se si è interessati al guasto in un punto qualsiasi lungo la linea si deve seguire una nuova strada. Bisogna selezionare la linea con un click del tasto destro del mouse e dal menù attivo che verrà fuori s dovrà scegliere la voce "Calcolate..." e poi successivamente "Short Circuit..." per arrivare alla finestra di dialogo come in Fig.11.

DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : Grid\Grid]	
Short-Circuit Calculation - Study Case\Short-Circuit Calculation.ComShc *	×
Basic Options Advanced Options Verification	Execute
ap shc/full/3psc/b1	
Method complete Select 'complete' method	
Fault Type 3-Phase Short-Circuit Type 3-Phase Short-Circuit	Cancel
Load Flow   Study Case\Load Flow Calculation	
- Fault Impedance Short-Circuit Duration	re d
. Resistance, Rf 0. Ohm Breaker Time 0.1 s	
Reactance, Xf 0. Ohm	Res
Output	
: 🗖 On	
	(4-6
Fault Location     At all Bushars and Terminals	
User Selection Grid/Line (3-9)	
Short-Circuit at Line/Line Route	
Fault Distance from Line Length: 101.186 km	
C Terminal j: Rete AT\Grid\Nodo 9 Relative 60	
	Ľ

Fig.146: Dettaglio scheda del guasto

In tale finestra (vedi Fig.11) diventa adesso importante l'ultima sezione in basso, dove è possibile scegliere il punto dove si vuole accada il guasto introducendo la percentuale della lunghezza della linea.

Paragrafo 4.3: Lo studio statico del corto-circuito nelle reti ad Alta Tensione

Ci si posizioni in un nodo di puro carico (scelto in maniera del tutto arbitraria) come per esempio il nodo 9 e si scelga di effettuare un corto-circuito trifase.

Verranno effettuate tre simulazioni di guasto nello stesso nodo, la prima senza alcun impianto di generazione distribuita, nella seconda si introdurrà l'impianto eolico "Windfarm 1" e nella terza simulazione verrà incluso anche il secondo impianto eolico "Windfarm 2".

Le grandezze prese in considerazione, per vedere l'influenza della generazione distribuita sulla rete, sono:

- 1) la potenza di corto circuito al nodo  $S_{K}^{"}$  espressa in [*MVA*];
- 2) la corrente di corto-circuito a regime  $I_{K}^{"}$  espressa in [kA];
- 3) il valore di picco della corrente di corto-circuito  $i_p$  espressa in [kA].

Oltre al nodo, scelto per il guasto, si è scelto di osservare anche ciò che succede in tutte le linee che alimentano lo stesso nodo.

I risultati della prima simulazione sono riportati nella Tab.5.

8					
	Sk" [MVA]	lk" [kA]	ip [kA]		
nodo 9	4211,83	10,81	24,26		
linea (3-9)	Al nodo 3: 2548,88	6,54	14,68		
linea (4-9)	Al nodo 4: 1030,7	2,64	5,94		
linea (8-9)	Al nodo 8: 632,9	1,62	3,65		

Tah.8:	Corto-circuito	senza	generazione	distribuita
1 av.o.		sunza	gener azione	uistiinuita

I risultati della seconda simulazione sono riportati nella Tab.6.

Tubly: Conto en cuito con un implanto conco						
	Sk" [MVA]	lk" [kA]	ip [kA]			
nodo 9	4227,75	10,85	24,36			
linea (3-9)	Al nodo 3: 2553,35	6,55	14,7			
linea (4-9)	Al nodo 4: 1039,58	2,67	5,99			
linea (8-9)	Al nodo 8: 635,48	1,63	3,66			

Tab.9: Corto-circuito con un impianto eolico

I risultati della terza simulazione sono riportati nella Tab.7

	Sk" [MVA]	Ik" [kA]	ip [kA]
nodo 9	4246,15	10,9	24,44
linea (3-9)	Al nodo 3: 2554,27	6,55	14,7
linea (4-9)	Al nodo 4: 1041,4	2,67	5,99
linea (8-9)	Al nodo 8: 651,13	1,67	3,75

Tab.10:	<b>Corto-circuito</b>	con due	impianti	eolici
1	conto en cuito	com auc	mprant	conter

Può essere notato come l'introduzione della generazione distribuita influenzi tutte e tre le grandezze ed in particolar modo esse aumentano all'aumentare del numero di impianti eolici presenti in rete. C'e da notare inoltre che tali aumenti dipendono anche dalle potenze dei rispettivi impianti eolici.

Si può dunque concludere, che una massiccia (quindi in numero e potenza) penetrazione di impianti di generazione distribuita può portare un innalzamento delle correnti di guasto tale per cui le protezioni delle linee, predisposte dal gestore della rete di trasmissione, risulteranno inadeguate.

**Paragrafo 4.4**: Lo studio dinamico del corto-circuito nelle reti ad Alta Tensione

Questo studio, a differenza di quello condotto nel paragrafo precedente, viene eseguito con una simulazione (RMS Simulation) nel tempo allo scopo di verificare quale sia l'influenza della generazione distribuita sulla stabilità della rete AT in seguito ad un guasto.

Verranno prese in considerazione sia la configurazione di guasto transitorio sia la configurazione di guasto permanente con relativa esclusione del ramo guasto.

In tale studio si farà l'ipotesi che i generatori asincroni degli impianti eolici lavorino sempre alla loro potenza nominale e ciò può essere fatto escludendo tutti i Composite Model dei generatori eolici (bisogna selezionare la voce "Out of Service" nella finestra di dialogo dello stesso Composite Model).

La prima prova che si esegue è quella di un corto-circuito al nodo 7 (nodo di puro carico) che non viene estinto dall'intervento delle protezioni di linea ed inoltre si suppone che non intervengano neanche le protezioni di macchina.

Nella Fig.12 viene riportato l'andamento della corrente iniettata in rete dal generatore sincrono denominato GS7 e come si può notare si passa da un valore pre-guasto di 10.349 kA ad un valore di 14.94 kA che varierà (aumentando) in maniera debole con il proseguire della simulazione.



Fig.147: Andamento corrente iniettata da generatore sincrono

Nella Fig.13 viene riportato l'andamento della corrente nella linea che alimenta il carico (linea 7-8).





Con il software DIgSilent esiste la possibilità di restringere la finestra temporale fino ai millisecondi (EMT Simulation) e permettere di visualizzare i fenomeni elettromagnetici, che per esempio avvengono all'interno delle macchine sincrone. Nella Fig.14 viene riportato l'andamento della corrente iniettata in rete dal generatore GS7. Questa volta però ci saranno i valori istantanei della stessa corrente e non il valore efficace. Adesso possono essere notate le tre finestre temporali caratterizzanti un corto-circuito (subtransitorio, transitorio e regime).



Fig.149: Contributo alla corrente del GS7 senza generazione distribuita

Adesso si farà la stessa simulazione tenendo conto di entrambi gli impianti eolici. Il risultato è riportato nella Fig.15 e come si può notare è diminuito il picco di corrente immediatamente successivo al guasto.



Fig.150: Contributo alla corrente del GS7 con generazione distribuita

Si supponga adesso che il guasto si estingua e si rieseguano le stesse prove. Nella Fig.16. Si può notare che dopo l'avvenuta estinzione del guasto, la corrente iniettata in rete dal generatore GS7 avrà un andamento tendente al valore preguasto (ci arriverà dopo 30 s circa).



Fig.151: Contributo corrente di guasto

Se si effettuasse la stessa simulazione di cui sopra, includendo però gli impianti eolici si otterrebbe un andamento abbastanza simile a quello di Fig.16, sarà cambiato però il picco di corrente successivo al guasto e più precisamente sarà diminuito.

Eseguendo una EMT Simulation (con una finestra temporale di 2 s) si passerà ad una rappresentazione con valori istantanei ottenendo quanto riportato in Fig.17.



Fig.152: Andamento corrente con valori istantanei

Si effettueranno adesso delle simulazioni per controllare l'andamento della frequenza ai capi del generatore GS7, al nodo in cui avviene il guasto ed infine ad un nodo lontano dallo stesso guasto. Nel caso di guasto permanente ai capi del generatore l'andamento è quello mostrato nella Fig.18.



Fig.153: Frequenza con guasto permanente ai capi del generatore sincrono

Al nodo in cui si presenta il guasto l'andamento sarà quello riportato in Fig.19.



Fig.154: Frequenza al nodo guasto permanente

Nel nodo 4 invece la frequenza ha l'andamento mostrato in Fig.20.



Fig. 155: Frequenza al nodo 4 con guasto permanente

Delle variazioni così pronunciate della frequenza sono, per un sistema elettrico, inammissibili. Per fortuna una tale tipologia di guasti nelle reti AT è quasi del tutto assente motivo per cui si vedrà cosa succede alla stessa frequenza nel caso in cui il guasto si estingue.

La frequenza, ai capi del generatore GS7, dopo la perturbazione dovuta al guasto tende al suo valore nominale con tempi che vanno oltre il minuto come mostrato nella Fig.21.



Fig.156: Frequenza ai capi del generatore sincrono con guasto transitorio

Al nodo 7, dove avviene il guasto, l'andamento della frequenza è molto simile a quello precedente (Fig.21). Può essere però notato che a distanza di due minuti, ancora non è stato raggiunto il valore nominale (Fig.22).



Fig. 157: Frequenza al nodo 7 con guasto transitorio

Al nodo 4 cambia l'andamento ma non cambia il comportamento a regime, come mostrato nella Fig.23



Fig.158: Frequenza al nodo 4 con guasto transitorio

Nel caso della frequenza, l'influenza degli impianti di generazione distribuita si manifesta con un ritardo maggiore nella convergenza al valore nominale.

## CAPITOLO 5

## STUDIO DELLA RETE IN MEDIA TENSIONE

Paragrafo 5.1: Definizione della rete in Media Tensione

La rete in media tensione, oggetto di studio in tale capitolo, presenta distribuzione di tipo radiale. Le caratteristiche elettriche di tale rete, verranno qui di seguito elencate seguendo il protocollo IEEE e poi successivamente verrà mostrato come passare alla rappresentazione secondo il sistema internazionale. Nelle Tab.1 e Tab 2 vengono riportate le caratteristiche dei carichi.

Codice	Connessione	Modello del carico
Y-PQ	Wye	Potenza attiva e reattiva costanti
Y-I	Wye	corrente costante
Y-Z	Wye	impedenza costante
D-PQ	Delta	Potenza attiva e reattiva costanti
D-I	Delta	corrente costante
D-Z	Delta	impedenza costante

Tab.11: Modelli dei carichi

Nodo	Modello del carico	Fase A [kW]	Fase B [kW]	Fase C [kW]	Fase A [kvar]	Fase B [kvar]	Fase C [kvar]
634	Y-PQ	160	120	120	110	90	90
645	Y-PQ	0	170	0	0	125	0
646	D-Z	0	230	0	0	132	0
652	Y-Z	128	0	0	86	0	0
671	D-PQ	385	385	385	220	220	220
675	Y-PQ	485	68	290	190	60	212
692	D-I	0	0	170	0	0	151
611	Y-I	0	0	170	0	0	80

Nella Tab.3 vengono riportate invece le caratteristiche elettriche di un carico rappresentato con il modello dei carichi distribuiti.

Nodo A	Nodo B	Modello del carico	Fase A [kW]	Fase B [kW]	Fase C [kW]	Fase A [kvar]	Fase B [kvar]	Fase C [kvar]
632	671	Y-PQ	17	66	117	10	38	68

Tab.13: Caratteristiche elettriche dei carichi distribuiti

Nella Tab.4 sono riportate le configurazioni delle linee elettriche.

Nodo A	Nodo B	Lunghezza [ft]	Configurazione
632	645	500	603
632	633	500	602
633	634	0	XFM-1
645	646	300	603
650	632	2000	601
684	652	800	607
632	671	2000	601
671	684	300	604
671	680	1000	601
671	692	0	Switch
684	611	300	605
692	675	500	606

Tab.14: Caratteristiche delle linee

Le Tab.5 e Tab.6 riportano la corrispondenza tra i codici delle configurazioni e la disposizione delle fasi per ogni conduttore.

1 abildi Disposizione dene fasi nene fince aci ce	Tab.15: Dis	posizione	delle fasi	nelle	linee aeree
---	-------------	-----------	------------	-------	-------------

Configurazione	Sequenza delle fasi	Caratteristiche delle fasi (ACSR)	Caratteristiche del neutro (ACSR)	Disposizone spaziale (ID)
601	BACN	556,5	4/0	500
602	CABN	4/0	4/0	500
603	CBN	1/0	1/0	505
604	ACN	1/0	1/0	505
605	CN	1/0	1/0	510

Configurazione	Sequenza delle fasi	Caratteristiche delle fasi (AA)	Caratteristiche del neutro (AA)	Disposizone spaziale (ID)
606	ABCN	250	/	515
607	AN	1/0	1/0	520

Tab. 16: Disposizione delle fasi nelle linee in cavo

Nella Tab.7 sono riportate le caratteristiche elettriche corrispondenti ai codici riportati nelle Tab.5 e Tab.6.. Le sigle ACSR ed AA, identificanti il materiale costituente il conduttore, corrispondono rispettivamente ad alluminio rinforzato ed allumino.

Fase	Tipo di conduttore	Resistenza [Ohm/mile]	Diametro esterno del conduttore [inch]	Raggio geometrico medio [ft]	Portata [A]
556,5	ACSR	0,1859	0,927	0,313	730
250	AA	0,41	0,567	0,0171	329
4/0	ACSR	0,592	0,563	0,00814	340
1/0	ACSR	1,12	0,398	0,00446	230
1/0	AA	0,97	0,368	0,0111	310

Tab.17: Caratteristiche elettriche

Nella Tab.8 sono riportate le caratteristiche dei due trasformatori presenti nella rete.

	kVA	kV lato alta tensione	kV lato bassa tensione	Resistenza [%]	Reattanza [%]
Substation	5000	115 - D	4,16 Gr. Yn5	1	8
XFM-1	500	4,16 - Z	0,48 Gr. Zn6	1,1	2

Tab.18: Caratteristiche dei trasformatori

Nella Tab.9 sono riportate le caratteristiche dei condensatori.

Nodo	Fase A [kvar]	Fase B [kvar]	Fase C [kvar]
675	200	200	200
611			100

Si riporta per ultima la Tab.10 con le conversioni delle u.d.m. dal sistema inglese al sistema europeo.

Tab.20: Conversioni

1 ft	30,48 cm
1 inch	2,54 cm
1 mile	1609,344 m

Nella Fig.1 vengono indicate le disposizioni spaziali, in metri, corrispondenti ai codici delle configurazioni riportate nelle tabelle precedenti, nel caso di linee aeree.



Fig.159: Distanze tra conduttori per linee aeree

Nella Fig.2 sono riportate invece le distanze tra i conduttori nel caso di linee in cavo.



Fig.160: Distanze tra i conduttori per linee in cavo

A questo è possibile calcolare le matrici di impedenza (vedi dalla Tab.11 alla Tab.17) delle linee, facendo però attenzione alle dimensioni in quanto espresse in Ohm/miglio e non in Ohm/km.

Configurazione 601				
0,3465+j1,0179	0,1560+j0,05017	0,1580+j0,4236		
0,1560+j0,05017	0,3375+j1,0478	0,1535+j0,3849		
0,1580+j0,4236	0,1535+j0,3849	0,3414+j1,0348		

Tab.21

Tab.22

Configurazione 602		
0,7526+j1,1814	0,1580+j0,4236	0,1560+j0,5017
0,1580+j0,4236	0,7475+j1,1983	0,1535+j0,3849
0,1560+j0,5017	0,1535+j0,3849	0,7436+j1,2112

Tab.23

Configurazione 603		
0	0	0
0	1,3294+j1,3471	0,2066+j0,4591
0	0,2066+j0,4591	1,3238+j1,3569

Tab.24

Configurazione 604		
1,3238+j1,3569	0	0,2066+j0,4591
0	0	0
0,2066+j0,4591	0	1,3294+j1,3471

Т	ิล	h	.2	5
	a	ν	•	-

Configurazione 605		
0	0	0
0	0	0
0	0	1,3292+j1,3475

Tab.26

Configurazione 606		
0,7982+j0,4463	0,3192+j0,0328	0,2849-j0,0143
0,3192+j0,0328	0,7891+j0,4041	0,3192+j0,0328
0,2849-j0,0143	0,3192+j0,0328	0,7982+j0,04463

Tab.27
--------

Configurazione 607		
1,3425+j0,5124	0	0
0	0	0
0	0	0

Nelle successive tabelle (dalla Tab.18 alla Tab.24) verranno invece riportate le matrici di suscettanza riguardanti i parametri trasversali delle linee stesse. bisogna anche qui fare attenzione alle u.d.m., infatti le suscettanze verranno espresse in  $\mu S / mile$ .

Tab.28

Configurazione 601		
0+j6,2998	0-j1,9958	0-j1,2595
0-j1,9958	0+j5,9597	0-j0,7417
0-j1,2595	0-j0,7417	0+j5,6386

## Tab.29

Configurazione 602		
0+j5,6990	0-j1,0817	0-j1,6905
0-j1,0817	0+j5,1795	0-j0,6588
0-j1,6905	0-j0,6588	0+j5,4246

Tab.30

Configurazione 603		
0	0	0
0	0+j4,7097	0-j0,8999
0	0-j0,8999	0+j4,6658

Tab.31

Configurazione 604		
0+j4,6658	0	0-j0,8999
0	0	0
0-j0,8999	0	0+j4,7097

Т	a	b	.3	2
_				_

Configurazione 605			
0	0	0	
0	0	0	
0	0	0+j4,5193	

Tab.33

	Configurazione 606	
0+j96,8897	0	0
0	0+j96,8897	0
0	0	0+j96,8897

Tab.34

Configurazione 607				
0+j88,9912	0	0		
0	0	0		
0	0	0		

Paragrafo 5.2: Definizione del modello di una linea elettrica

Per poter effettuare la definizione di una linea elettrica, in ambiente DIgSilent, servono tutte le informazioni sulle caratteristiche elettriche e meccaniche riguardanti la linea stessa. Per prima cosa bisogna introdurre nello schema unifilare il componente Linea elettrica, successivamente bisognerà selezionare lo stesso componente con un doppio click per avere l'accesso alla scheda descrittiva, come mostrato in Fig.3.

BMS-Simulation EMT-Simulation Harmon Basic Data Load Flow VDE/IEC Short	ics Optimization Reliability Description -Circuit Full Short-Circuit ANSI Short-Circuit	OK
Name End Type I Girdttxbara 632 aV.ob_4 Terminal j Girdttxbara 637 V.Cub_8 Zone Terminal i	sbarra 632 a sbarra 671	Figure >>
Parameters       Length of Lines       Parameters       Length of Line       1.       Laying	Resulting Values           Rated Current         0, kA           Pos. Seq, Impedance, Zngle         0, 0 hm           Pos. Seq, Resistance, Angle         0, deg           Pos. Seq, Resistance, X1         0, 0 hm           Pos. Seq, Resistance, X1         0, 0 hm           Zero Seq, Resistance, X1         0, 0 hm           Zero Seq, Resistance, X1         0, 0 hm           Zero Seq, Resistance, X0         0, 0 hm           Zero Seq, Resistance, N0         0, 0 hm	
Line Model C Lunged Parameter (PI) Distributed Parameter Routes/Cubicles/Sections		

Fig.161: Dettaglio scheda linea elettrica

La prima cosa da fare è quella di definire un tipo per la linea nell'apposito campo denominato "Type" selezionando il tasto 🖬 e facendo comparire un primo menù attivo dal quale scegliere la voce "New Project Type" (le altre voce avrebbero imposto la scelta di un tipo o dalla libreria generale di DIgSilent, la prima, oppure dalla libreria di progetto) entrando così in un secondo menù attivo, come mostrato in Fig.4. In tale figura può essere notato come nella sezione denominata "Resulting Values" tutti i valori abbiano valore nullo non essendo ancora stata definita la linea. Inoltre nella sezione in basso, denominata "Line Model" si può scegliere se il modello per la linea debba essere a parametri concentrati oppure a parametri distribuiti.

Basic Data	Load Flow VDE/IEC Sh	ort-Circuit Full Short-	Circuit ANSI Short-Circuit	ок
Name	Line			Cancel
Туре	•			Figure >>
Terminal i	Select Global Type	4	sbarra 632 a	Jump to
Terminal j	Bookerrojecerrype 7	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	sharra 671	
Zone	New Project Type	Ine Type (TypIne)		
Dut of Service	Remove Type	Tower Geometry Type (Type	ieo)	
- Number of		- Resulting Values		
narallel Lines	1	Rated Current	0. kA	
paraneranies		Pos. Seq. Impedance,	Z1 0. Ohm	
Parameters		Pos. Seq. Impedance, Ros. Seq. Resistance	Angle 0. deg P1 0. Ohm	
Length of Line	1. km	Pos. Seq. Reactance,	×1 0.0hm	
Derating Facto	и 1.	Zero Seq. Resistance,	R0 0.0hm	
Laying	Ground	Zero Seq. Reactance, Earth-Eault Current Los	XU U.Uhm . ΠΔ	
		Earth Factor, Magnitud	e 0.	
		Earth Factor, Angle	0. deg	
Line Model				
Eumped P	arameter (PI)			
C Distributed	Parameter			
Davida a /Cu	Alalas /0 antiana			
noutes/Lu	Dicies/Sections			

Fig.162: Dettaglio scelta del tipo per la linea

In questo secondo menù attivo, la prima voce "Line Type" serve per definire la linea attraverso i parametri di sequenza diretta, inversa ed omeopolare per unità di lunghezza. Vengono inoltre richiesti altri dati, come mostrato in Fig.5.

DIg9	siLENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : Grid\\Grid] e - Grid\\Line.ElmLne	×
43 (14)	Line Type - Library/Line Type: TypIne     RMS-Simulation   EMT-Simulation   Harmonics   Optimization   Reliability   Description     Basic Data   Load Flow   VDE //EC Short-Circuit   Full Short-Circuit   ANSI Short-Circuit	
	Ime Type         Rated Voltage       0       KV         Rated Current       1       KA (in ground)         Nominal Frequency       50       H2         Cable / OHL       Cable       Image: Strategy (in ground)         System Type       AC       Image: Phases         Parameters per Length 12:Sequence       Resistance R0       0         Resistance R*       0       Ohm/km         Resistance X*       0       Ohm/km	Cancel

Fig.163: Dettaglio scheda di definizione delle linee elettriche

Passiamo adesso alla terza voce del menù, la seconda verrà trattata per ultima, denominata "Tower Geometry Type" che porta ad una finestra di dialogo come in Fig.6.



Fig.164: Dettaglio della scheda di definizione delle linee elettriche

In tale finestra possono essere definiti il numero di conduttori di neutro, il numero di conduttori di fase disposti in parallelo ed infine nella parte inferiore si trovano le sezioni dove introdurre le coordinate spaziali di ogni singolo conduttore. Per questa ultima operazione deve essere prestata particolare attenzione alla scelta dell'origine del sistema di riferimento, nel senso che deve essere scelta una volta sola e sarà valida per tutti i conduttori, pena il malfunzionamento del modello.

Passiamo adesso alla seconda voce del menù attivo, denominata "Tower Type", la quale è stata lasciata per ultima perché è la strada che si è scelto di seguire, per cui verrà trattata più in dettaglio. La finestra di dialogo che verrà fuori è mostrata in Fig.7.

Fig.165: Dettaglio della scheda di definizione delle linee elettriche

In tale finestra, a differenza della precedente in Fig.6, è presente la possibilità di scegliere le modalità con cui introdurre i dati nella sezione centrale denominata "Input Mode". La modalità impostata per default dal software è quella con parametri geometrici. Nelle due sezioni inferiori bisognerà introdurre la tipologia del conduttore sia per le fasi che per il conduttore di terra. Si farà adesso una digressione per mostrare come sia possibile introdurre tali caratteristiche dei conduttori in DIgSilent.

Per prima cosa bisognerà selezionare con un singolo click del tasto destro del mouse la libreria di progetto che è possibile trovare nel Data Manager. Successivamente

bisognerà selezionare il tasto "New Object" ( 🖹 ) presente nella barra degli strumenti dello stesso DataManager, aprendo così una finestra di dialogo come mostrato in Fig.8.

Fig.166: Dettaglio lista componenti

Da tale finestra bisogna selezionare l'ultima voce "Special Type" e poi, successivamente dal campo sottostante (denominato "Characteristic") si dovrà scegliere la voce "Conductor Type" e dare l'OK. Si aprirà una finestra come in Fig.9.

DIgS	ILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : Grid\\Grid]	
	Data Manager - \nino\IEEE 13 Node Test Feeder finale nino\Library :	
۴	Conductor Type - Library\Conductor Type.TypCon *	×
<b>a</b> 	VDE/IEC Short-Circuit Full Short-Circuit ANSI Short-Circuit RMS-Simulation EMT-Simulation Harmonics Optimization Reliability Description Basic Data Load Flow Name Conductor Type Nominal Voltage 6. kV Nominal Current 1. kA Number of Subconductors 1 🛓	OK 2
	(Sub-)Conductor         DC-Resistance       0.05         Diameter       30         GMR (Equivalent Radius)       11.682         ✓ Skin effect	
	Conductor Type      Substation 1b      Action Conductor Type      Acti	

Fig.167: Dettaglio scheda descrittiva del conduttore

Avendo compilato tale scheda in ogni sua parte, è possibile procedere oltre selezionando Ok. Si potrà notare adesso, come un tipo per i conduttori compaia nella libreria del progetto. Finisce qui la digressione e si riparte dalla scheda di definizione delle linee elettriche lasciata alla Fig.7. Nei rispettivi campi nelle due sezioni denominate "Types of earth conductors" e "Conductor Types of line circuits" bisogna selezionare la zona in nero con un click del tasto destro, facendo comparire una finestra come in Fig.10.

DIgSILENT PowerFactory 13.1	- [Graphic : Grid\\Grid]	
RMS-Simulation EMT-Simu Basic Data Load Flow Name Nominal Frequency Number of Earth Wires Number of Line Circuits Input Mode © Geometrical Parameter	ulation   Harmonics   Optimization   Reliability   Description     VDE/IEC Short-Circuit   Full Short-Circuit   ANSI Short-Circuit    Tower Type(17)  50. Hz  1 ==  1 ==  1 ==  Earth Conductivity   100. uS/cm	Cancel Cancel Calculate
C Electrical Parameter Types of Earth Conductors:  Earth Conductor 1	Conductor Types TypCon New Element/Type Edit Element/Type	
Conductor Types of Line Circuits: Conductor Ty Circuit 1	Reset Element/Type	

Fig.168: Dettaglio della definizione del tipo di conduttore

Dal menù bisognerà scegliere la voce "Select Element/Type" la quale farà comparire una nuova finestra che inviterà alla scelta del tipo di conduttore direttamente dalla libreria del progetto. Tale selezione deve avvenire selezionando il simbolo ad del componente e non il suo nome.

Eseguita la scelta si può dare l'OK ritornando alla scheda iniziale, notando che adesso i rispettivi campi contengono i tipi per i conduttori. Adesso per proseguire nella definizione bisogna passare alla disposizione spaziale dei conduttori selezionando l tasto ▶, posto in alto a destra della stessa scheda, che porterà ad una seconda pagina della stessa scheda come mostrato in Fig.11.



Fig.169: Dettaglio seconda pagina della scheda della linea elettrica

Come si può notare in tale pagina si dovranno introdurre le coordinate spaziali dei singoli conduttori, dopo di che si potrà dare l'Ok in entrambe le pagine poiché la linea è stata definita completamente.

A questo punto, selezionando la linea con un doppio click si accederà alla scheda della stessa, nella quale sarà possibile notare come nella sezione "Resulting Values" tutte le grandezze hanno valori diversi da zero.

Ritornando alla Fig.10, alla sezione "Input Mode" esiste una seconda possibilità per definire le linee ovvero introducendo i parametri elettrici. Con tale modalità scomparirà la sezione riguardante il conduttore di terra, mentre rimarrà quella per i circuiti di linea, per i quali la selezione del tipo di conduttore rimane identica a quella eseguita precedentemente. Ciò che sarà cambiato è invece la seconda pagina della scheda che

adesso apparirà come in Fig.12. In tale seconda pagina sono presenti più cartelle ma quella che ricoprirà più interesse sarà quella denominata "Load Flow".

Basic	iimulation Data	Load Flo	Simulation	Harmonics Optimization Reliability Description VDE/IEC Short-Circuit ANSI Short-Circuit ANSI Short-Circuit	OK
					Cancel
Matrix	of Resistanc	es R_ij (Oh	m/km]:		
	1	2	3		
▶1	0.215305	0.096934	0.098177		Calculate
2	0.096934	0.209713	0.09538		
3	0.098177	0.09538	0.212136		
ļ	•				
Matrix	of Beactanc	esXii∏h	m/kml		
		2	2		
<b>N</b> 1	0 633494	0.011740	0.060010		
2	0.002464	0.511742	0.203213		
4	0.00001742	0.001073	0.233100		
3	0.263213	0.239166	0.642395		
	4				

Fig.170: Dettaglio scheda definizione matrici

Come si può notare nella Fig.12 vengono introdotte le matrici di resistenza e reattanza (parametri longitudinali) espresse in ohm/km. Il tasto ➡ permette di scegliere quali grandezze si vuole siano introdotte nelle rispettive matrici. Introdotte le matrici dei parametri longitudinali si passerà alla definizione di quelle relative ai parametri trasversali selezionando il tasto ▶. La terza pagina è mostrata in Fig.13

DigSILENT P	PowerFa	ctory 13	.1 - [Grap  / 2/43 PA Type(16).	iic : Grid\\Grid] >> Elector (ypTow	vil X
RMS-Simul Basic Data	lation a	EMT- Load Flo	Simulation	Harmonics Optimization Reliability Description /DE/IEC Short-Circuit Full Short-Circuit ANSI Short-Circuit	OK Cancel
Matrix of Co	onductar	nces G_ij (u	uS/km]:	Ž	
	1	2	3		
	0.	0.	0.	A	Calculate
2	U.	U. 0	U. 0.		
	0.	0.	0.		
Matrix of St	usceptar	nces B_ij (u	iS/km]:	<u> </u>	
	1	2	3		
▶1 3.9	913893	1.240133	-0.782617		
2 -1.3	240133	3.703186	-0.460871		
3 -0.7	782617	-0.460871	3.503663		

Fig.171: Dettaglio scheda di definizione matrici

Eseguita anche questa operazione si potrà dare l'OK a tutte le pagine perché la linea è stata definita in ogni sua parte.

In ultimo bisogna trattare delle linee elettriche bifase e monofase, con o senza neutro in quanto bisognerà specificare quali fasi devono essere presenti e quali no. Più precisamente nel caso in cui una linea trifase arriva in un nodo ed il successivo tratto di linea è rappresentato da una linea bifase oppure monofase allora bisognerà specificare quali fasi continuano e quali invece no. Per fare ciò, innanzitutto, tutti i nodi della rete devono avere a disposizione tre poli per le fasi ed uno per il neutro come mostrato in Fig.14. A tale scheda si arriva selezionando con un doppio click il nodo.

DIoSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic · Grid\ \Grid]	
File Edit Calculation Data Output Options Window Help	
	3 📼 📼 🛛 mod
Terminal - Grid\\sbarra 645.ElmTerm	
RMS-Simulation         EMT-Simulation         Harmonics         Optimization         Reliability         Description           Basic Data         Load Flow         VDE/IEC Short-Circuit         Full Short-Circuit         ANSI Short-Circuit	ОК
Name sbarra 645	Cancel
Type Type Library\bus(8)	Jump to
Zone 👤 🔿	Cubicles
Dut of Service	
System Type AC 💌	
Phase Technology ABC-N	
Nominal Voltage ABC ABC	
Line-Line 2PH kV 2PH-N	
Line-Ground 1PH	
n opsprå sitt ore freg planen spestrore 🔤 🕬 🕫	2107
Grid Project1 (EOLO /	0506

Fig.172: Dettaglio scheda descrittiva del nodo

Quando una linea elettrica viene collegata ad un nodo, è possibile vedere come sono collegati i conduttori di fase e neutro semplicemente selezionando la linea nello schema unifilare e poi successivamente (nella cartella denominata "Basic Data") andare a selezionare il tasto denominato "Figure>>" presente in alto a destra. A questo punto, nella parte inferiore della scheda comparirà una finestra che descrive in maniera schematica come la linea è connessa ai nodi, come mostrato nella Fig.15.

📕 Line - Grid\\l	ine 645-646 OHL CBN.ElmLne	
RMS-Simulati	on EMT-Simulation Harmo Load Flow VDE/IEC Shor	nics Optimization Reliability Description rt-Circuit Full Short-Circuit ANSI Short-Circuit U
Name Type Terminal i Zone Dut of Serv Parallel Lines Parallel Lines Length of Lin Derating Fac	Line 645-646 DHL CBN + Library/Tower Type(4) + Grint//sbara 645/Cub_2 + Grint//sbara 646/Cub_2 Terminal i ice 1 0.09144 km Tower Type	Besulting Values     Cancel       sbarra 645     Jump to       Rated Current     0.23 kA       Pos. Seq. Impedance, Zh. 0.08138439 0hm       Pos. Seq. Repedance, R1     0.080382638 0hm       Pos. Seq. Resistance, R1     0.0803220 bhm       Zero Seq. Resistance, R0     0.097136 0hm       Zero Seq. Resistance, R0     0.0097136 0hm       Zero Seq. Resistance, R0     0.009702 A       Earth-Fault Current, Ice     0.00155072 A       Earth Factor, Angle     0.2343187       Earth Factor, Angle     27.2087 deg
Line Model C Lumped Distribute Routes/C	45 \ Cub_2	Terminal j b sbarra 848 \ Cub_2

Fig.173: Dettaglio scheda definizione linea elettrica

Naturalmente, per il buon funzionamento del modello ci deve essere coerenza nel nome delle fasi passando dal nodo di sinistra al nodo di destra. Per poter variare le fasi collegate, bisognerà selezionare il tasto 🗈 del campo "Terminal i" (e lo stesso lavoro andrà fatto nel campo "Terminal j") che farà aprire una nuova finestra, come in Fig.16.

DIg5ILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : Grid\\Grid]     Line - Grid\\Line 645-646 OHL CBN.ElmLne	×
RMS-Simulation EMT-Simulation Harmonics Optimization Reliability Descrip Basic Data Load Flow VDE/IEC Short-Circuit Full Short-Circuit ANSI Short-Cir	otion OK
Rame Line 645-646 OHL CBN	Cancel
Type ▼ → Library/Tower Type(4)	Figure >>
Cubicle - Grid/usbara 645\Cub_2.staCubic  Basic Data [Description]	Jump to
Vame OK Cancel	
Connected with  GridVVLine 645-646 DHL CBN	
Bus Index Terminal i	
No of Phases: 2 Phases: cb	
Phase 1 c	
Phase 2 b	
Terminate feeder at this point	
Internal Elements Remove Breaker	
C Distributed Parameter	
Routes/Cubicles/Sections	

Fig. 174: Dettaglio scheda descrizione collegamenti al nodo

Tesi di Laurea

Maggio 2007

La variazione del nome delle fasi da collegare al nodo può essere eseguita selezionando il tasto I nei rispettivi campi denominati "Phase 1" e "Phase 2" e dare successivamente l'Ok per ritornare alla scheda della linea. A questo punto si potrà notare come le variazioni siano state riportate nella rappresentazione schematica di cui alla Fig.15.

C'è da precisare però che un errore nel nome delle fasi di una linea, passando dal nodo di monte a quello di valle, conduce ad un messaggio di errore da parte del software. Un errore invece tra il nome delle fasi della linea che arriva al nodo di carico ed il nome delle fasi del carico che vengono collegate allo stesso nodo porta invece ad una condizione di funzionamento in cui il carico non verrà alimentato (nella finestra "Output Window" di DIgSilent comparirà il messaggio che una determinata aerea non è stata alimentata).

Paragrafo 5.3: Definizione del modello di un carico

In tale paragrafo si vuol mostrare come definire un carico partendo però dalla nomenclatura, usata dal protocollo IEEE, e riportata nelle tabelle descrittive della rete MT. La disposizione delle fasi è riportata nelle figure dalla Fig.17 alla Fig.19.



Fig.175: Disposizione delle fasi per carichi trifase più neutro



Fig.176: Disposizione delle fasi per carichi trifase e monofase



Fig.177: Disposizione delle fasi per carichi bifase e monofase con neutro

Fatto ciò si può andare nello schema unifilare di DIgSilent introdurre i carichi e definirli uno ad uno. Si selezioni per prima cosa il simbolo del carico presente nello schema unifilare con un doppio click per accedere alla scheda descrittiva come in Fig.20.



Fig.178: Dettaglio scheda del carico

Bisognerà scegliere un tipo per il carico nel campo "Type" selezionando il tasto , il quale farà comparire il menù attivo come in Fig.21.

	DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : Grid\\Grid]	
	General Load - Grid\\General Load.ElmLod	×
- <u>-</u>	RMS-Simulation         EMT-Simulation         Harmonics         Optimization         Reliability         Description           Basic Data         Load Flow         VDE/IEC Short-Circuit         Full Short-Circuit         ANSI Short-Circuit	ок
<b>بو</b>	Name General Load Type ♥ + Select Global Type	Cancel -
	Select Project Type  Select Project Type  General Load Type (TypLod)	Jump to
	Nelliuve Irype	

Fig.179: Dettaglio scelta del tipo per il carico

Da tale menù dovrà essere scelta la voce "General Load Type". Verrà fuori una finestra di dialogo come mostrato in Fig.22.

DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : Grid\\Grid]				
🖵 General Load - Grid\\General Load.ElmLod				
General Load Type - Library\General Load Type(30).TypLod	<b>X</b> 9			
RMS-Simulation   EMT-Simulation   Harmonics   Optimization   Reliability   Description     Basic Data   Load Flow   VDE/IEC Short-Circuit   Full Short-Circuit   ANSI Short-Circuit	ОК			
Name [General Load Type(30]	Cancel			
System Type AC 💌				
Technology ABC-D'				
1				

Fig.180: Dettaglio descrizione del tipo per il carico

In tale scheda andrà riempito il campo denominato "System Type" per specificare se si tratta di un carico AC oppure DC. Successivamente si passerà al campo "Technology" per specificare con quale tipo di collegamento il carico dovrà essere allacciato alla rete. Eseguite queste scelte bisognerà passare alla seconda cartella della stessa scheda, denominata "Load Flow", nella quale andranno definite le dipendenze del carico dalla potenza attiva e reattiva e per le quali si usano i codici usati per descrivere i modelli ZIP. Fatto ciò si può dare l'OK e ritornare così alla scheda iniziale (vedi Fig.20). Adesso si dovrà selezionare la cartella "Load Flow" che apparirà come in Fig.23.

D	IgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : Grid\\Grid]	
	General Load - Grid\\General Load.ElmLod *	X
1	RMS-Simulation EMT-Simulation Harmonics Optimization Reliability Description	ОКО
	Basic Data Load Flow VDE/IEC Short-Circuit Full Short-Circuit ANSI Short-Circuit	
2	Input Mode Default	Cancel
	Balanced/Unbalanced	Figure >>
	Operating Point	Jump to
storra	Total Active Power Load 0. kW	
	Total Reactive Power Load 0. kvar	
	Voltage 1. p.u.	
	Scaling Factor 1.	
	Adjusted by Load Scaling	
		-
F		

Fig.181: Dettaglio definizione delle potenze del carico

Nella Fig.23, al campo denominato "Input Mode" è possibile scegliere quali coppie grandezze descriveranno il carico. Nel campo "Balanced/Unbalanced" si dovrà specificare se il carico è bilanciato oppure no ed in quest'ultimo caso la sezione sottostante cambierà immediatamente in quanto verranno richieste le potenze attive e reattive assorbite da ciascuna fase (vedi Fig.24).

eneral Load - Grid\\Gen	eral Load.ElmL	od *		
RMS-Simulation   EMT-Simu Basic Data   Load Flow   \	lation Harmoni VDE/IEC Short-Ci	cs   Optimization   Re rcuit   Full Short-Circuit	liability Description	ОК
Input Mode	Default	<b>•</b>		Cancel
Balanced/Unbalanced	Unbalanced	T		Figure >>
Operating Point			-	Jump to
Total Active Power Load	0.	k₩		
Total Reactive Power Load	0.	kvar		
Voltage	1.	p.u.		
Scaling Factor	1.			
🗌 🗌 Adjusted by Load Scalir	ng			
Phase a				
Active Power	0.	kW		
Reactive Power	0.	kvar		
Phase b			-	
Active Power	0.	kW		
Reactive Power	0.	kvar		
Phase c				
Active Power	0.	kW		
Reactive Power	0.	kvar		

Fig.182: Dettaglio descrizione di un carico squilibrato

Nella Fig.23 come anche nella Fig.24 compaiono due campi denominati rispettivamente "Voltage" e "Scaling Factor"; il primo serve per legare la tensione di alimentazione del carico a quella del nodo a cui è allacciato, il secondo serve come fattore di scala delle potenze, nel senso che si può fare assorbire allo stesso carico una potenza multipla di quella definita negli appositi campi.

Si ribadisce, ancora una volta, che bisogna prestare attenzione affinché ci sia congruenza tra il nome delle fasi attive per il carico ed il nome delle fasi fisicamente presenti al nodo, pena la non alimentazione dello stesso carico.

Paragrafo 5.4: Definizione del modello di un trasformatore

La prima cosa da fare è quella di costruire un tipo per il trasformatore direttamente nella libreria di progetto, poiché sono noti i parametri necessari per la sua definizione (vedi Tab.8). Per definire il tipo si procederà come per i conduttori, ovvero si selezionerà con un singolo click la libreria di progetto, si selezionerà il tasto "New Object" e dalla lista

che apparirà successivamente si sceglierà la voce "2-Winding Transformer Type" e dare poi l'Ok. Comparirà una finestra di dialogo, come in Fig.25, che dovrà essere in ogni sua parte con i dati in proprio possesso e successivamente dare l'Ok.

RMS-Simulation EM Basic Data Load F	IT-Simulation Harmon Now VDE/IEC Short	ics Optimization Circuit Full Shor	Reliability t-Circuit AN	Description	ОК
Name	T1 AT/MT Substation				Canc
Technology	Three Phase Transforme	•			
Rated Power	5. MVA				
Nominal Frequency	60. Hz				
Rated Voltage		Vector Group			
HV-Side	115. kV	HV-Side	D 💌		
LV-Side	4.6 kV	LV-Side	YN 💌		
Positive Sequence Imped	ance	Phase Shift	5	*30deg	
Short-Circuit Voltage uk	8. %	-	D. F.		
Copper Losses	50. kW	Name	Dyno		
Zero Sequ. Impedance, S	hort-Circuit Voltage				
Absolute uk0	0. %				
Resistive Part ukr0	0. %				

Fig.183: Dettaglio della scheda descrivente il tipo per il trasformatore

Adesso si dovrà introdurre un trasformatore nello schema unifilare e selezionarlo con un doppio click per avere accesso alla sua scheda di definizione, come in Fig.26.

	D	IgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : Grid\\	srid]	
		2-Winding Transformer - Grid\\T1 AT/MT Subs	ation.ElmTr2	×
	۲ <u>۳</u>	BMS-Simulation EMT-Simulation Harmonics Basic Data Load Flow VDE/IEC Short-Circu	Optimization Reliability Description	ок 🛛
	æ	Name T1 AT/MT Substation		Cancel
		Type   Type  Library\T1 AT/MT Substation	Fig	gure >>
		HV-Side Grid\\sbarra AT\Cub_2	sbarra AT Jur	mp to
		LV-Side Grid\\sbarra 650\Cub_2	sbarra 650	
		Zone HV-Side		
		Out of Service External Star Point     Number of     parallel Transformers	Flip Connections	
		Rating Factor 1.	Rated Power 5. MVA	
			rounding Impedance, LV Side	
		5	ar Point grounded	
		H	e ju. Uhm	
		×	e U. Uhm	
K				
I				-
I.				
	1.1			

Fig.184: Dettaglio scheda del trasformatore

Per prima cosa bisognerà selezionare il tipo a cui il modello dovrà puntare, scegliendolo dalla libreria del progetto. Successivamente si potrà andare direttamente nella sezione in basso, "Grounding Impedance", e definire i valori dell'impedenza del collegamento verso terra del centro stella del trasformatore. Fatto ciò si può dare l'Ok poiché il trasformatore è stato definito nelle sue parti essenziali.

Nell'ambito della Media Tensione però alcuni trasformatori sono equipaggiati con un regolatore di tensione che ricopre il compito di mantenere costante la tensione in un determinato punto.

Nel seguito verrà mostrato come dimensionare un regolatore di tensione per un trasformatore trifase, il quale ha però un difetto costituito dal fatto che agisce soltanto su di una fase. Si vedrà solo successivamente come realizzare un regolatore di tensione trifase. Nel caso in cui si volesse introdurre un regolatore di tensione nello schema unifilare, il software prevede una sua definizione nella stessa scheda di definizione del trasformatore. Come primo passo bisogna selezionare il tipo per il trasformatore che è presente nella libreria in maniera da accedere alla sua scheda come mostrato in Fig.27.

	DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : Grid\\Grid]					
	2-Winding Transformer Type - Library\T1 AT/MT Substation.TypTr2					
۲ ۲	RMS-Simulation EMT-Simulation Harmonics Optin Basic Data Load Flow VDE/IEC Short-Circuit I	nization Reliability Description OK				
2	Name T1 AT/MT Substation	Cancel				
	Technology Three Phase Transformer	<u>▼</u>				
	Rated Power 5. MVA					
	Nominal Frequency 60. Hz					
	Rated Voltage	àroup				
	HV-Side 115. kV HV-Side	D				
	LV-Side 4.6 kV LV-Side	YN 💌				
	Positive Sequence Impedance	hift 5 *30deg				
	Short-Circuit Voltage uk 8. %	Dun5				
	Copper Losses 50. kW	5,10				
	Zero Sequ. Impedance, Short-Circuit Voltage					
	Absolute uk0 0. %					
	Resistive Part ukr0 0. %					
<u> </u>						
Г	J <sup>1</sup>					

Fig.185: Dettaglio scheda definizione del trasformatore

A questo punto si dovrà selezionare la cartella denominata "Load Flow" che apparirà come nella seguente Fig.28.

	DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : Grid\\Grid]						
	2-Winding Transformer Type - Library\T1 AT/MT Substation.TypTr2	<u> </u>					
×e	RMS-Simulation EMT-Simulation Harmonics Optimization Reliability Description Basic Data Load Flow VDE/IEC Short-Circuit Full Short-Circuit ANSI Short-Circuit	ОК					
	Basic Data Load Flow VDE/IEC Short-Circuit Full Short-Circuit ANSI Short-Circuit Tap Changer at Side Magnetizing Impedance No Load Current 0. % Additional Voltage per Tap 0. % Phase of du 0. deg Neutral Position 0 Maximum Position 0 Maximum Position 0 Tap dependent impedance	Cancel					
Ē		=					

Fig.186: Dettaglio scheda descrittiva del regolatore di tensione

Come si può notare in tale cartella (vedi Fig.28) bisogna specificare l'avvolgimento che ospita il regolatore di tensione nel campo "at Side", l'ampiezza (espressa in percento della tensione nominale dell'avvolgimento sul quale il regolatore viene montato ed agisce) di uno step del regolatore nel campo "Additional Voltage per Tap" (il regolatore di tensione infatti non ha la possibilità di variare con continuità), l'angolo di fase della variazione di tensione nel campo "Phase of du" e nei campi sottostanti andranno introdotti rispettivamente i numeri che identificano la presa centrale, il massimo incremento positivo ed il massimo incremento negativo (questi ultimi due andranno introdotti in modulo e segno). Il regolatore è così stato definito completamente, per cui si può selezionare l'Ok ed uscire dalla scheda. A questo punto bisogna entrare nella scheda del trasformatore presente nello schema unifilare ed andare direttamente alla cartella "Load Flow" che apparirà come in Fig.29. In tale finestra alla sezione "Tap" compaiono delle voci con valore nullo che verranno cambiati al momento in cui nella scheda del tipo del trasformatore verranno introdotti i dati del regolatore di tensione. Nel campo "Tap Position" può essere scelta la posizione che il regolatore dovrà mantenere durante il funzionamento e l'unico modo per variare la tensione è l'intervento manuale.
DIgSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : Grid\\Grid]	
2-Winding Transformer - Grid\\T1 AT/MT Substation.ElmTr2	×
2-Winding Transformer - Grid\\T1 AT/MT Substation.ElmTr2         RMS-Simulation       EMT-Simulation         Basic Data       Load Flow         VDE/IEC Short-Circuit       Full Short-Circuit         According to Measurement Report         Additional Voltage per Tap       0. %         Phase of du       0. deg         Position       Neutral: 0 Min: 0 Max: 0         Tap Position       0         Automatic Tap Changing	n OK it Cancel Figure >> Jump to
Automatic Tap Lhanging	

Fig.187: Dettaglio scheda descrizione del regolatore

Per fare agire automaticamente il regolatore bisognerà innanzitutto posizionare la presa in posizione neutrale (variazione di tensione nulla) nel campo "Tap Position" e poi bisognerà selezionare la voce "Automatic Tap Changing". La cartella si modificherà immediatamente come in Fig.30.

DIGSILENT PowerFactory 13.1 - [Graphic : Grid\\Grid]	×
RMS-Simulation   EMT-Simulation   Harmonics   Optimization   Reliability   Description   Basic Data Load Flow   VDE/IEC Short-Circuit   Full Short-Circuit   ANSI Short-Circuit	ОК
Image: Tap       According to Measurement Report         Additional Voltage per Tap       0. %         Phase of du       0. deg         Position       Neutral: 0 Min: 0 Max: 0         Tap Position       0 ÷         ✓ Automatic Tap Changing	Cancel

Fig.188: Dettaglio scheda regolatore di tensione

Contrariamente a quanto avviene nella realtà, il software DIgSilent offre la possibilità di una variazione continua della tensione. Tuttavia, per lo studio della rete si è scelto un regolatore discreto. Nel campo "Controlled Node" si sceglie se il nodo da controllare sia dal lato a tensione inferiore o superiore del trasformatore. Nel campo "Control Mode" si può scegliere la grandezza da controllare potendo tra tensione, potenza attiva e potenza reattiva. Nel nostro caso si è optato per un controllo in tensione, per cui il passo successivo è quello di riempire il campo "Phase", che altrimenti scomparirebbe, con la fase da controllare (si può scegliere di controllare una tensione di fase come una tensione concatenata). A questo punto selezionando l'opzione "Remote Control" sarà possibile scegliere un nodo della rete da tenere sotto controllo, ovvero far lavorare il regolatore di tensione in maniera tale da mantenere costante la tensione a questo nodo.

Nei campi sottostanti andranno inserite le impostazioni in tensione, espressi in p.u., che determinano il valore di tensione da mantenere al nodo (la base di riferimento per il sistema in per unit è la tensione del nodo controllato), i suoi limiti superiore ed inferiore. Nell'ultimo campo "Controller Time Costant" deve essere introdotto il valore della costante di tempo che determina il ritardo della risposta del regolatore di tensione. Il trasformatore funzionerà adesso con il suo regolatore di tensione.

Qualora si desiderasse costruire un trasformatore con un regolatore che controlli e corregga le tensioni su tutte e tre le fasi, un modo sarebbe quello di costruire tre trasformatori monofase tra gli stessi nodi ed equipaggiarli con un regolatore (che come già detto può controllare soltanto una tensione, sia essa di fase oppure concatenata).

La prima cosa da fare sarà quella di costruire nella libreria un tipo per il trasformatore monofase introducendo anche i dati per il dimensionamento del regolatore di tensione. Il secondo passo sarà quello di entrare nello schema unifilare, inserendo tre trasformatori monofase tra i nodi che avrebbero ospitato il trasformatore trifase. Il terzo passo sarà quello di selezionarli uno ad uno e far si che nel campo "Type" venga puntato il tipo di trasformatore costruito nella libreria di progetto. In tale modo, si è sicuri che i tre trasformatori saranno identici (tale procedura è, a dire il vero, consigliabile in tutti quei casi in cui in maniera ricorsiva bisogna introdurre gli stessi dati per gli stessi componenti). L'ultimo passo sarà quello di entrare nella cartella riguardante il regolatore di ogni trasformatore e modificare il nome della fase sotto controllo (nel campo "Phase") e far sì che ciascuna delle fasi sia controllata da un trasformatore.

Lo schema unifilare del trasformatore con regolatore di tensione su tre fasi è mostrato in Fig.31.



Fig.189: Dettaglio dello schema unifilare con regolatore trifase

Paragrafo 5.5: Le prove sulla rete in Media Tensione

Le reti di distribuzione sono generalmente esercite in configurazione radiale passiva, per cui i flussi di potenza sono diretti dalla stazione AT/MT ai carichi. L'introduzione della generazione distribuita nei sistemi di distribuzione, tradizionalmente passivi, può richiedere una revisione delle procedure di progettazione e di gestione delle reti stesse. Una prima conseguenza dell'introduzione della generazione distribuita, indipendentemente dalla tipologia del generatore, è l'alterazione dei flussi di potenza attiva e reattiva. Questo discorso ha delle ripercussioni sul controllo di tensione, sulle perdite in rete e sulla selettività delle protezioni.

Nella Fig.32 viene riportato lo schema unifilare della rete in Media Tensione oggetto di studio. In tale schema si può notare la presenza di un impianto di generazione distribuita.



Fig. 190: Dettaglio dello schema unifilare della rete MT

In tale rete è stato inserito un impianto di generazione distribuita, nel riquadro rosso,costituito da tre generatori eolici dalla potenza di 3 MW ciascuno.

Verranno eseguite su tale rete due tipi di prove. Il primo tipo saranno delle simulazioni di load flow, tese a verificare la dipendenza delle perdite di potenza e della caduta di tensione lungo una linea scelta arbitrariamente. Il secondo tipo di simulazioni serviranno invece a verificare quale contributo apportano gli impianti di generazione distribuita alle correnti di corto circuito.

Le simulazioni di load flow verranno eseguite impostando un determinato valore della potenza attiva e facendo in seguito variare la potenza reattiva. Nella Fig.33 è riportato l'andamento della perdita di potenza, espressa in kW, lungo una linea. In tale figura si può notare come, per un determinato valore della potenza attiva della generazione distribuita, le perdite di potenza in linea diminuiscono all'aumentare della potenza reattiva verso valori positivi.



Fig.191: Andamento della perdita di potenza in linea

Nella Fig.34 è invece riportato l'andamento della caduta di tensione, espressa in kV, sempre lungo la stessa linea.



Fig.192: caduta di tensione in linea

Il secondo tipo di simulazioni che verrà condotto, sulla rete in Media Tensione, è nel dominio del tempo. Si ipotizzerà la stessa tipologia di guasto, con la differenza però che il guasto si estingue. Quest'ultima prova verrà eseguita una prima volta in assenza di generazione distribuita con il risultato riportato nella Fig.35.



Fig.35: Andamento della corrente di guasto senza generazione distribuita

La seconda volta si eseguirà la stessa simulazione comprendendo l'impianto di generazione distribuita ed ottenendo il risultato come in Fig.36.



Fig.36: Andamento della corrente di guasto in presenza di generazione distribuita

#### Maggio 2007

Può essere notato come la presenza della generazione distribuita influenzi i picchi delle correnti di corto circuito più che gli andamenti stessi. Un'ultima simulazione verrà eseguita ai capi della generazione distribuita, costituita anche da macchine rotanti, e vedere così il contributo delle macchine rotanti alla corrente di guasto, come in Fig.37.



Fig.37: contributo del generatore asincrono al corto circuito

# **Bibliografia**

### Capitolo 1:

1)Manual DIgSILENT Power Factory 13.1.260.

#### Capitolo2:

1)J.G. Slootweg, H. Polinder, W.L. Kling, "Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator", IEEE, 0-7803-7173-9/01, 2001, pagg.644-649.
2)Vestas Wind Systems, "Advanced Grid Optino 2".

3)J.G. Slootweg, S.W.H. Haan, H. Polinder, W.L. Kling, "General Model for Representing Variable Speed Wind Turbine in Power system Dynamic Simulation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, no.1, February 2003, pagg.144-151.

4)S.Corsi, M.Pozzi, "Control Systems of Wind Turbine Generators an Italian Experience", 0-7803-7989-6/03, 2003, IEEE, pagg.1970-1976.

5)S.Suryanarayanan, A.Dixit, "On the dynamic of the Pitch Control Loop in Horizontal\_Axis Large Wind Turbines",0-7803-9098-9/05, 2005, IEEE, pagg.686-690.
6)M.C. Jischke, "On the Aerodynamics of Windmill Blades", Prok. Okla. Acad. Sci. 56: 121-124, 1976

## Capitolo 3-4-5:

1)C.Bossi, F.Sanson, M.Scagliotti, E.Tassi, "Generazione Distribuita: Tecnologie, Opportunità e Benefici", art.4°/2001, Cesi Spa.

2)A.Agustoni, M.Brenna, R.Faranda, E.Tironi, C.Pinella, G.Simioli, "Constraints for the Interconnection of the Distributed Generation in Radial Distribution Systems", art. 5°/2002, "Ricerca di Sistema", Cesi.

3)A.Agustoni, M.Brenna, R.Faranda, E.Tironi, G.Simioli, "Distributed Generation Control Methodologies and Network Reconfiguration: Effects on Voltage Profile", art. 10°/2002, "Ricerca di Sistema", Cesi.

4)C.Bossi, R.Cicoria, B.Delfino, F.Fornari, S.Massucco, F.Silvesrto, "Problematiche e Ruolo della Generazione Distribuita nell'Evoluzione del Sistema Elettrico Italiano", art. 13/2003, "Ricerca di Sistema", Cesi.

5)G.Celli, R.Cicoria, B.Colombo, R.Faranda, M.Lissandrin, F.Pilo, S.Poretta, L.Sfondrini, E.Tironi, G.Valtorta, "La Generazione Distribuita e le Tendenze

dell'Evoluzione della Rete di Distribuzione", art16/2003, 2/2, Cesi, AEI, ENERCOM, ABB,Enel distribuzione, Politecnico di Milano, Università di Cagliari.

6)M.Brenna, R.Faranda, "Ottimizzazione di Potenza Attiva e Reattiva della Generazione Distribuita per Ridurre le Perdite e Migliorare i Profili di Tensione", L'Energia Elettrica- Volume 81(2004)- "Ricerche".