



Ricerca di Sistema elettrico

Progettazione e costruzione delle configurazioni di reti ibride di lavoro

A. Ricca, G. Adinolfi, R. Ciavarella, A. Merola, M. Valenti

PROGETTAZIONE E COSTRUZIONE DELLE CONFIGURAZIONI DI RETI IBRIDE DI LAVORO
A. Ricca (ENEA), G. Adinolfi (ENEA), R. Ciavarella (ENEA), A. Merola (ENEA), M. Valenti (ENEA)

Gennaio 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021- III Annualità

Obiettivo: *Sistema Elettrico*

Progetto: *2.7 Modelli e strumenti per incrementare l'efficienza energetica nel ciclo di produzione, trasporto, distribuzione dell'elettricità*

Work package: *Analisi delle problematiche di gestione per l'integrazione nelle attuali reti in AC di nuove reti in DC in MT/BT (Media Tensione/Bassa Tensione)*

Linea di attività: *LA 1.5 Progettazione e costruzione delle configurazioni di reti ibride di lavoro*

Responsabile del Progetto: *Maria Valenti, ENEA*

Indice

SOMMARIO.....	4
1 DEFINIZIONE DELLE CONFIGURAZIONI DI RETE	5
1.1 CITY AREA	5
1.1.1 Carichi nella City Area	6
1.1.2 Generazione da fonti rinnovabili nella City Area.....	7
1.1.3 Stazioni di ricarica nella City Area.....	8
1.1.4 Configurazione di rete dell'Area Residenziale (Residential).....	9
1.1.5 Configurazione di rete del settore Area Metropolitana (Underground)	11
1.1.6 Configurazione di rete del settore Servizi stradali (Road Services)	13
1.1.7 Configurazione di rete del settore Parco Rinnovabili (Wind Park)	15
1.1.8 Interconnessioni tra i settori	17
1.2 PORT AREA.....	17
1.2.1 Generazione da fonti rinnovabili nella Port Area	18
1.2.2 Sistemi di accumulo a servizio della Port Area.....	18
1.2.3 Stazioni di ricarica nella Port Area	19
1.2.4 Configurazione di rete della Port Area	19
1.2.5 Configurazione di rete del settore Services	22
1.2.6 Configurazione di rete del settore Handling Machines.....	22
1.2.7 Configurazione di rete del settore Parco Generazione Eolica	24
1.2.8 Configurazione di rete del settore BESS Charging.....	25
2 IMPLEMENTAZIONE DELLE CONFIGURAZIONI DI RETE IN AMBIENTE SIMULATIVO	28
2.1 MODELLO DI RETE IN DIGSILENT POWERFACTORY.....	28
2.1.1 Rete esterna	28
2.1.2 Busbar	29
2.1.3 Linee di connessione AC e DC.....	29
2.1.4 Trasformatori	30
2.1.5 Convertitori AC-DC	30
2.1.6 Convertitori DC-DC.....	31
2.1.7 Carichi AC e DC.....	32
2.1.8 Generatori eolici AC	34
2.1.9 Generatori eolici, micro-eolici DC, generatori fotovoltaici, batterie	35
2.2 MODELLO DI RETE NEPLAN	36
2.2.1 Rete esterna	37
2.2.2 Busbar	38
2.2.3 Linee di connessione AC e DC.....	38
2.2.4 Trasformatori	39
2.2.5 Convertitori AC-DC	39
2.2.6 Convertitori DC-DC.....	40
2.2.7 Punti di carico	42
2.2.8 Generatori eolici AC	44
2.2.9 Generatori eolici e micro-eolici DC.....	45
2.2.10 Generatori fotovoltaici	45
2.2.11 Accumulatore di energia elettrica (BESS)	46
3 CONCLUSIONI.....	47
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	48
ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	49

SOMMARIO

La linea di attività LA1.5 è stata incentrata sulla definizione ed individuazione di modelli di rete ibrida AC/DC, da utilizzare come riferimento nelle successive linee di attività. Attualmente, le microreti ibride AC/DC sono ancora poco diffuse nelle reti di distribuzione. Inoltre, esse, frequentemente, non integrano le tecnologie necessarie ad implementare gli scenari energetici futuri. Pertanto, le attuali configurazioni in contesto reale non rappresentano una base di lavoro idonea allo studio delle problematiche di affidabilità da condurre nelle successive LA del progetto 2.7. A partire da tali considerazioni, si è proceduto a progettare configurazioni di rete benchmark che rispondessero al requisito di rappresentatività degli scenari energetici futuri e includessero le relative tecnologie. Considerazioni connesse ai target energetico ambientali fissati dai piani energetici nazionali ed europei, congiuntamente alle analisi di scenario condotte nella LA1.4, hanno consentito di identificare nell'area urbana e nel settore portuale, due interessanti casi studio su cui costruire i modelli di reti ibride benchmark. Successivamente, a partire dai dati aggregati relativi alle risorse distribuite forniti dal Rapporto Tecnico RdS/PTR(2020)/001, sono state individuate, definite e dimensionate le tecnologie da integrare nei due modelli di rete (es. sistemi di generazione distribuita, sistemi di accumulo, diverse tipologie di punti di carico, linee, etc.) e costruiti i relativi profili di generazione, domanda o utilizzo per le tecnologie di accumulo (carica/scarica). Infine, le configurazioni progettate sono state implementate in due ambienti di simulazione (DIGSILENT PowerFactory e NEPLAN) al fine di ottenere i relativi modelli di rete per la successiva integrazione nel tool da sviluppare nell'ambito della LA1.16.

1 DEFINIZIONE DELLE CONFIGURAZIONI DI RETE

Come già evidenziato nel sommario, il primo passo nella definizione delle configurazioni di rete è consistito nella scelta dei casi studio su cui implementare i due modelli di rete benchmark. Le aree prescelte, in particolare, sono state una porzione di area urbana (City Area) e una zona portuale (Port Area). In entrambi i casi, la scelta è stata effettuata considerando la rilevanza di tali aree ai fini del raggiungimento dei target energetico ambientali fissati a livello nazionale ed europeo, come meglio dettagliato nel prosieguo.

La decentralizzazione delle attuali reti di distribuzione a livello urbano verso microreti DC interconnesse alla rete centrale AC è indicata dalla letteratura tecnico-scientifica di settore come un elemento chiave dalle politiche energetiche nazionali ed europee, anche in considerazione di una futura elettrificazione sia dei fabbisogni termici sia del settore del trasporto. Tale considerazione, congiuntamente alle analisi di scenario condotte nella LA1.4, hanno orientato verso la scelta della City Area come caso studio per la definizione di uno dei due modelli di rete ibrida benchmark.

Anche per l'area portuale si è tenuto conto della rilevanza di tale settore ai fini del raggiungimento degli obiettivi energetico-ambientali fissati dai legislatori europei e dalle analisi di scenario condotte nella LA1.4. Il trasporto marittimo, infatti, rappresenta la principale forma di trasporto merci a livello mondiale. Le normative energetico ambientali hanno stabilito un obiettivo di riduzione del 50% dei gas a effetto serra emessi dalle navi entro il 2050 [1]. Per raggiungere tale target, è necessaria una ristrutturazione che coinvolge non solo la tecnologia navale ma anche le infrastrutture portuali. Tale ristrutturazione non potrà prescindere dal ricorso alla generazione da fonti di energia rinnovabile "locali", come il solare fotovoltaico, l'eolico ed i sistemi di accumulo e la loro integrazione in microreti DC locali. Tali considerazioni hanno indotto a considerare le microreti portuali come un interessante caso studio da sviluppare nell'ambito del presente progetto e su cui modellare la seconda rete ibrida benchmark. Il focus sulla rete portuale, inoltre, ha anche consentito di integrare nel caso studio l'eolico on-shore, tecnologia ritenuta di particolare interesse, a livello europeo, per gli sviluppi energetici futuri.

Nel prosieguo del presente capitolo, sono descritti i due casi studio e le relative configurazioni di rete, dettagliando anche le scelte progettuali effettuate.

1.1 City Area

L'attuale sistema di distribuzione dell'energia elettrica nelle aree urbane è ancora fortemente di tipo centralizzato. I target energetici e ambientali richiedono la migrazione verso infrastrutture in grado di accogliere la produzione decentralizzata preservando, al contempo, l'affidabilità e l'adeguatezza del sistema energetico. Ad oggi, la diffusione di microreti ibride AC/DC basate su quantità significative di produzione energetica locale e in grado di funzionare in condizioni isolate dalla rete è limitata e, pertanto, ridotto è il numero di esempi di reti test in contesti reali di tipo urbano. In tali premesse, si è reso necessario procedere a definire un modello di rete ibrido idoneo a studiare, nelle successive LA, le problematiche di affidabilità che si intende indagare nel progetto. In tal senso, si è preliminarmente proceduto ad una analisi della letteratura tecnico scientifica nel settore delle reti elettriche urbane. Dai risultati dell'analisi è emerso che un modello di rete di tipo modulare, ovvero organizzato per macrosettori, sarebbe stato maggiormente funzionale ai fini dell'analisi da condurre. Le reti cittadine, infatti, evidenziano la presenza di differenti servizi elettrici caratterizzati da assorbimenti e specifiche completamente diversi. In tal senso, quindi, il modello benchmark configurato per la rete urbana è stato organizzato in quattro macrosettori principali:

- area di tipo residenziale comprensiva di consumatori e prosumer (Residential);
- rete di trasporto metropolitano, sia sotterranea che di superficie (Underground);
- sistemi per la ricarica delle autovetture elettriche e illuminazione stradale (Road Services);
- parco minieolico urbano (Wind Park).

Il modello di rete della City Area con i relativi macrosettori Underground, Residential, Wind Park e Road Services è di seguito rappresentato in Figura 1.

Nel prosieguo, si sintetizzano le considerazioni principali che hanno portato alla definizione delle configurazioni delle microreti per ciascuno dei suddetti macrosettori e alla scelta delle taglie delle relative risorse di generazione e carico e si descrivono, in dettaglio, le configurazioni adottate.

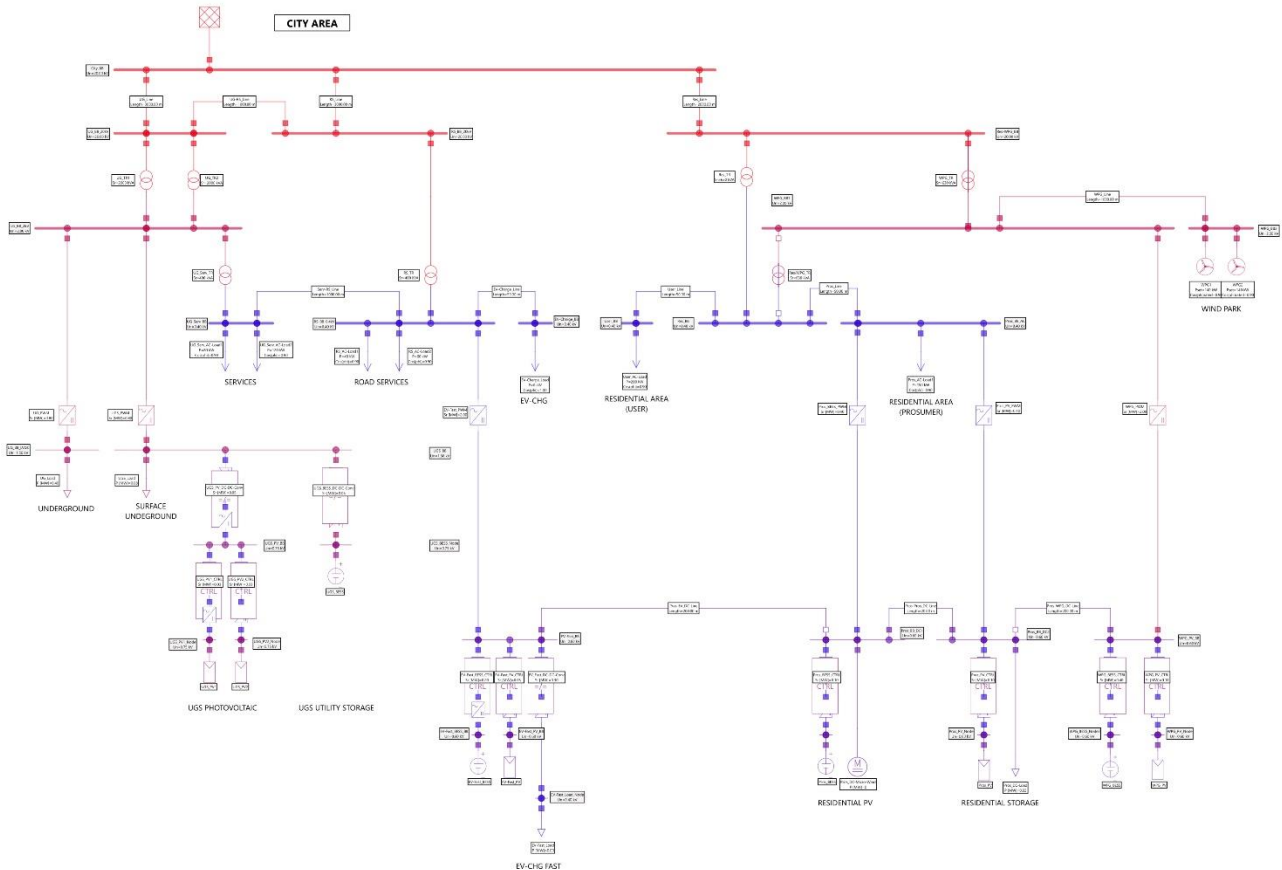


Figura 1. Modello della City Area

1.1.1 Carichi nella City Area

Il modello di rete dell'area urbana (City Area) è composto da un totale di **11 punti di carico**, distribuiti nei settori Underground, Road Services e Residential. Considerando gli assorbimenti tipici delle tipologie di carico considerato, si è stabilito che, complessivamente, l'insieme dei punti di carico ha un assorbimento nominale pari a circa 3.3 MW, distribuiti tra:

- 500 kW per la zona residenziale (**Residential**). Per quest'ultima, in particolare, sono state considerate 500 unità abitative caratterizzate da una taglia media di consumo di 3 kW per unità abitativa e una percentuale di sovrapposizione del 30% (potenza complessiva assorbita pari a 450 kW) a cui sono stati aggiunti 50 kW per i servizi condominiali;
- 2.4 MW per i carichi situati nel settore **Underground**, laddove il servizio della Metropolitana dispone di una potenza nominale pari a 2 MW, e l'insieme dei servizi annessi è caratterizzato da una potenza nominale di 400 kW;
- 400 kW per i servizi stradali (settor **Road Services**) derivanti da 200 kW di potenza nominale assorbita per l'illuminazione e 200 kW di potenza nominale associati ai servizi di ricarica dei veicoli elettrici.

Il dettaglio dei punti di carico della City Area è riportato in Tabella 1

Tabella 1. Dettaglio dei punti di carico della City Area

Nome	Settore	Tipologia	V_n	P_n
UG_Load	UNDERGROUND	Carico	1.5 kVdc	800 kW
UGS_Load	UNDERGROUND	Carico	1.5 kVdc	800 kW
UG_Serv_AC-Load1	UNDERGROUND	Carico	400 Vac	200 kW
UG_Serv_AC-Load2	UNDERGROUND	Carico	400 Vac	200 kW
RS_AC-Load1	ROAD SERVICES	Carico	400 Vac	100 kW
RS_AC-Load2	ROAD SERVICES	Carico	400 Vac	100 kW
EV-Charge_Load	ROAD SERVICES	EV-Charge	400 Vac	44 kW
EV-Fast_Load	ROAD SERVICES	EV-Charge	400 Vdc	300 kW
User_AC-Load	RESIDENTIAL AREA	Carico	400 Vac	250 kW
Pros_AC-Load	RESIDENTIAL AREA	Carico	400 Vac	200 kW
Pros_DC-Load	RESIDENTIAL AREA	Carico	600 Vac	50 kW

1.1.2 Generazione da fonti rinnovabili nella City Area

Sulla base dei dati riportati nel paragrafo precedente, la rete esterna deve garantire alla City Area una potenza elettrica di 3.3 MW, che si suppone prevalentemente proveniente da impianti di generazione elettrica centralizzata (centrali termoelettriche, idroelettriche, geotermiche e bio-combustori). Il report tecnico Report RdS/PTR2020/001 ha stabilito che, all'anno 2020 in Italia, il rapporto tra la potenza nominale delle installazioni di generazione fotovoltaica e quella delle installazioni centralizzate è pari al 23.2%, mentre il rapporto tra la potenza nominale delle installazioni di generazione da energia eolica rispetto alle installazioni centralizzate è dell'11.9%. In base a tali stime, ma ricordando anche che le aree urbane dispongono di rapporti bassi tra la superficie occupabile dai pannelli e le unità abitative, la city area dispone di impianti di generazione rinnovabile per 720 kW distribuiti tra fonte fotovoltaica (300 kW) ed eolica (420 kW), ripartiti tra i macrosettori come di seguito dettagliato.

Nelle **aree di tipo residenziale** (Residential), la presenza di fonti rinnovabili è essenzialmente riconducibile al fotovoltaico che, per le restrizioni tipiche degli ambiti urbanistici (es. disponibilità di spazi idonei all'installazione di impianti fotovoltaici), è comunque limitato ad installazioni di potenze piuttosto ridotte. Vincoli paesaggistici, associati a normative urbanistiche stringenti, inoltre, rendono poco praticabile la possibilità di installazioni eoliche all'interno di un'area cittadina, sebbene gli incentivi promuovano l'installazione di sistemi micro-eolici. In ragione di quanto premesso, si è ipotizzato che nei due complessi residenziali appartenenti alla categoria Prosumer sia presente rispettivamente una installazione di pannelli fotovoltaici per una capacità produttiva di 100 kW e un micro-eolico da 20 kW. Al fine di incrementare la percentuale di autoconsumo, inoltre, i due impianti sono stati integrati con sistemi di accumulo elettrico per una capacità aggregata di 200 kWh.

In relazione alla **rete di trasporto pubblico** (Underground), una piccola installazione fotovoltaica è stata concepita al fine di sostenere essenzialmente la fornitura energetica per tutto ciò che concerne i servizi ausiliari (es. ascensori, elevatori, sistemi di comunicazione di emergenza, etc.) determinando, quindi, una taglia di potenza installata pari a 50 kW (due installazioni di impianti fotovoltaici). Con lo scopo di assicurare una continuità di fornitura elettrica ai servizi ausiliari, inoltre, in aggiunta agli impianti fotovoltaici è stato installato un sistema di accumulo caratterizzato da una capacità complessiva di 100 kWh.

All'interno dell'**area dei servizi stradali** (Road Services), è stata prevista l'installazione di pannelli fotovoltaici anche nell'area destinata alla ricarica dei veicoli elettrici a copertura dei posti di sosta della stazione di ricarica. Supponendo di disporre di 18 postazioni di ricarica complessive, e che ognuna di queste disponga di una copertura costituita da 9 pannelli fotovoltaici da 300 W, la capacità di generazione ipotizzata per tale impianto è pari a 50 kW. Inoltre, in prossimità della stazione di ricarica, è stato previsto un sistema di

accumulo da 200 kWh: tale scelta, accoppiata alla possibilità in un futuro non troppo lontano della diffusione delle tecnologie Vehicle-to-grid, determina un incremento di resilienza dei servizi stradali.

Infine, in ottica prospettica, si è prevista nella City Area una sottosezione **parco rinnovabili** (Wind Park) rappresentativa di un'area periferica caratterizzata da una maggiore superficie sfruttabile con installazioni sia di tipo mini-eolico direttamente connesse alla rete di distribuzione AC (400 kVA), sia di tipo fotovoltaico connesse ad un sistema di barre per alimentazione DC (100 kW). Tale scelta vuole essere rappresentativa di iniziative di sfruttamento di aree libere da vincoli paesaggistici e inutilizzate per l'installazione di sistemi di generazione da fonte rinnovabile in essere in svariate amministrazioni locali (comuni, province, regioni). La sezione rinnovabili, in particolare, è stata nominata Wind Park per la presenza prevalente di eolico rispetto al fotovoltaico (due gruppi di eolo-generatori per una potenza complessiva di 400 kW e un impianto fotovoltaico da 100 kW). Infine, la presenza di maggiori spazi all'interno del parco eolico ha consentito l'installazione di sistemi di accumulo di capacità maggiore (400 kWh), permettendo di sopperire (parzialmente) all'intermittenza delle fonti eoliche e fotovoltaiche con una conseguente maggiore continuità di servizio.

Il dettaglio delle installazioni di impianti di generazione da fonti rinnovabili prescelto per ciascuna area e dei relativi sistemi di accumulo è rispettivamente riportato in Tabella 2 e Tabella 3.

Tabella 2. Dettaglio delle installazioni di impianti di generazione da fonti rinnovabili della City Area

<i>Nome</i>	<i>Settore</i>	<i>Tipologia</i>	V_n	P_n
UGS Photovoltaic	UNDERGROUND	Fotovoltaico	750 Vdc	50 kW
EV-Fast_PV	ROAD SERVICES	Fotovoltaico	600 Vdc	50 kW
Residential PV	RESIDENTIAL	Fotovoltaico	600 Vdc	100 kW
Pros_DC_Micro-Wind	RESIDENTIAL	Micro-Eolico	600 Vdc	20 kW
WPG1	WIND PARK	Eolico	2 kVdc	200 kW
WPG2	WIND PARK	Eolico	2 kVdc	200 kW
WPG_PV	WIND PARK	Fotovoltaico	600 Vdc	100 kW

Tabella 3. Dettaglio dei sistemi di accumulo presenti nella City Area

<i>Nome</i>	<i>Settore</i>	<i>Tipologia</i>	V_n	P_n	<i>Cap.</i>
UGS Utility Storage	UNDERGROUND	BESS	750 Vdc	50 kW	100 kWh
EV-Fast_BESS	ROAD SERVICES	BESS	600 Vdc	50 kW	200 kWh
Residential storage	RESIDENTIAL	BESS	600 Vdc	100 kW	200 kWh
WPG_BESS	WIND PARK	BESS	600 Vdc	100 kW	400 kWh

1.1.3 Stazioni di ricarica nella City Area

Come si è più volte evidenziato in diversi ambiti di ricerca, si prevede che nel prossimo futuro si raggiunga una forte penetrazione di veicoli, sia commerciali che privati, a trazione elettrica di tipo plug-in o ibrida. Il conseguimento di un simile obiettivo non può prescindere dalla massiva presenza nelle aree urbane di servizi adibiti alla ricarica di tali veicoli, e che siano costantemente adeguati alle tecnologie dei veicoli in circolazione. Sulla base di tali osservazioni, è stata prevista la presenza di una stazione di ricarica collocata nel settore dei Road Services, disponendo di connessioni sia di tipo 3a (AC), sia di tipo 4 (DC), al fine di contemplare le tecnologie plug-in attualmente disponibili sul mercato.

Il dettaglio delle stazioni di ricarica dei veicoli elettrici è riportato in Tabella 4 e le relative caratteristiche al paragrafo

Tabella 4. Dettaglio delle stazioni di ricarica della City Area

<i>Nome</i>	<i>Settore</i>	<i>Tipologia</i>	<i>V_n</i>	<i>P_n</i>
EV-Charge_Load	ROAD SERVICES	TIPO 3a	400 Vac	44 kW
EV-Fast_Load	ROAD SERVICES	TIPO 4	400 Vdc	300 kW

1.1.4 Configurazione di rete dell'Area Residenziale (Residential)

La zona residenziale progettata nella City Area (Figura 2) è costituita da due complessi abitativi, costituiti da un totale di 500 utenze private. I due complessi abitativi, il primo appartenente alla categoria degli utenti tradizionali (User) ed il secondo alla categoria dei Prosumer, sono connessi a due busbar indipendenti a 400 V (User_BB e Pros_BB), entrambe energizzate dalla busbar Res_BB, anch'essa a bassa tensione (400 Vac), a sua volta connessa alla barra Res-WPG_BB_20kV ad alta tensione (20 kV) attraverso il trasformatore Res_TR da 630 kVA.

Il complesso User è composto da 280 unità abitative (User_AC-Load) tradizionali, ovvero composte da soli utilizzatori dell'energia elettrica, con un assorbimento di targa di 250 kW.

Il complesso Prosumer, costituito da 220 unità abitative (Pros_AC-Load) per un assorbimento di targa di 220 kW, dispone inoltre di 2 sistemi indipendenti di generazione elettrica da fonti rinnovabili. La sottorete Prosumer è costituita da una busbar in corrente continua a 400 Vac (Pros_BB_AC1) e da 2 busbar in corrente continua a 600 Vdc (Pros_BB_DC1 e Pros_BB_DC2). Le due reti in corrente continua sono collegate alla busbar principale attraverso due inverter dedicati (rispettivamente Pros_BEES_PWM da 400 kVA e Pros_PV_PWM da 400 kVA), in aggiunta sono collegate tra di loro attraverso una apposita linea, in configurazione normalmente-chiusa (NC). Infine, il complesso Prosumer dispone anche di un sistema di pannelli fotovoltaici (Pros_PV) con una produttività massima di 100 kW e di un impianto micro-eolico in DC (DC_Micro-Wind) da 20 kW per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, accoppiato ad un sistema di accumulo a batterie (Pros_BEES) con capacità pari a 200 kWh. Tali sistemi sono tutti caratterizzati da una tensione di 600 Vdc: il sistema di accumulo e l'impianto micro-eolico sono connessi alla busbar Pros_BB_DC1, mentre l'installazione fotovoltaica afferisce alla busbar Pros_BB_DC2. A quest'ultima busbar sono collegati anche l'insieme dei carichi (Pros_DC-Load1) in corrente continua relativi alle facilities condivise (ascensori, montacarichi, sistemi di condizionamento di alcune aree, sistemi di illuminazione, sistemi di comunicazione interna) del complesso residenziale, per un assorbimento nominale di 50 kW.

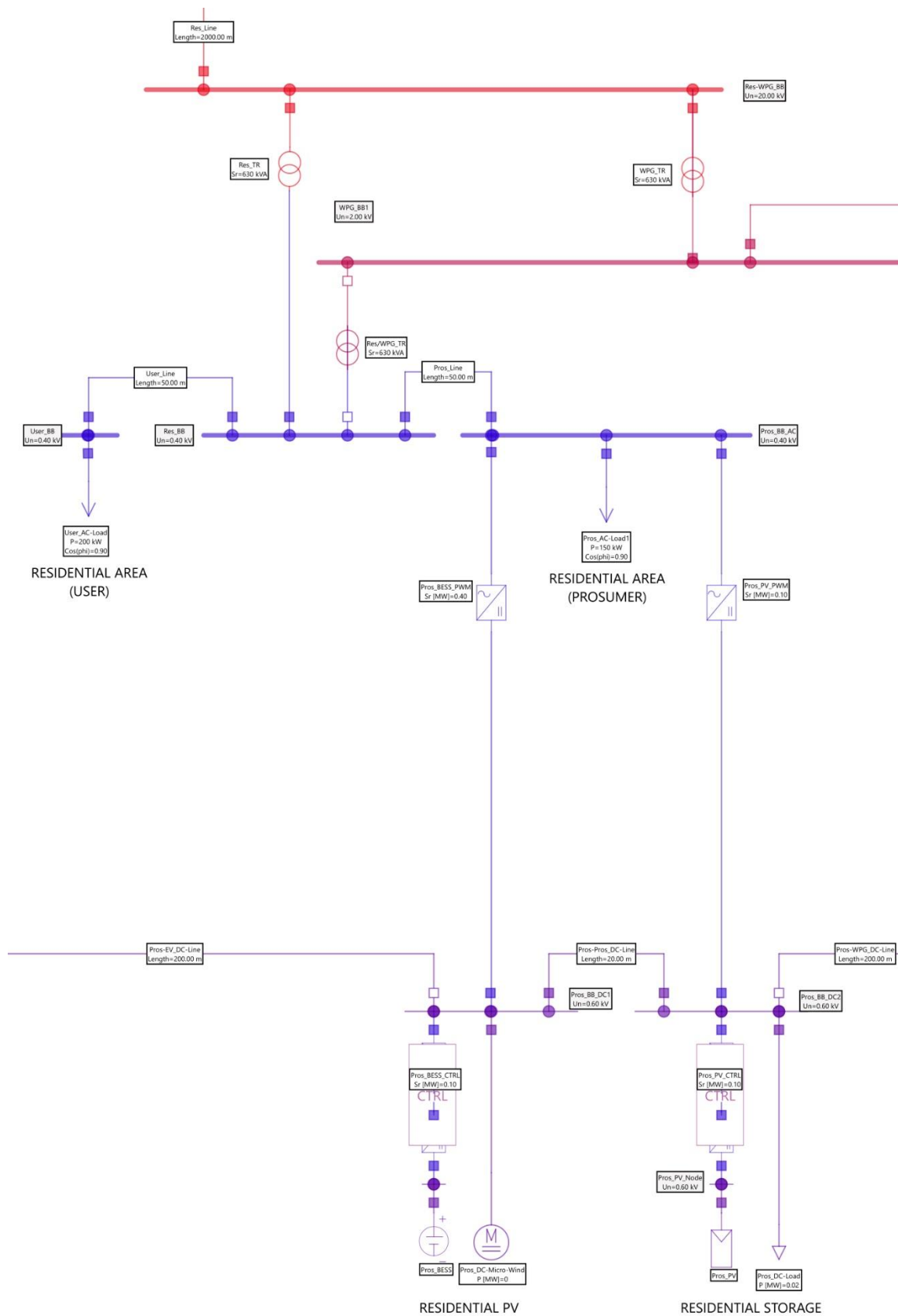


Figura 2- Settore Residenziale della City Area

1.1.5 Configurazione di rete del settore Area Metropolitana (Underground)

La rete metropolitana descrive l'insieme di un troncone di piccole dimensioni di una rete metropolitana e un circuito di metropolitana urbana di superficie di una piccola città. La relativa configurazione, riportata in Figura 3, si sviluppa a partire dalla busbar UG_BB_20kV, di tensione nominale 20 kV in corrente alternata, che alimenta tramite una coppia di trasformatori (UG_TR1 e UG_TR2) da 2 MVA una busbar da 2 kV (UG_BB_2kV), dalla quale si diramano tutte le altre sotto-porzioni. In particolare, è stato rappresentato l'assorbimento relativo al servizio di trasporto metropolitano sia sotterraneo (Underground) che di superficie (Surface Underground): entrambi i carichi (UG_Load e UGS_Load) sono alimentati in corrente continua, con una tensione di 1.5 kV, ognuno con un assorbimento massimo di 800 kW. Il valore di tensione di 1.5 kV risulta un giusto trade-off tra una linea metropolitana sotterranea ed una linea tramviaria di superficie [2], [3]. La conversione tra corrente alternata a 2 kV a corrente continua a 1.5 kV avviene mediante due indipendenti convertitori inverter (UG_PWM e UGS_PWM) con potenza di targa di 800 kVA.

All'interno del modello di rete sono state altresì previste utenze di servizio (Services) connesse alla stazione metropolitana (uffici, negozi, servizi di illuminazione). Tali carichi vengono alimentati da una corrente alternata a 400 V, ricevendo la potenza dalla busbar UG_BB_2kV mediante un apposito trasformatore (UG_Serv_TR) da 400 kVA. Le utenze di servizio, entrambe con un assorbimento massimo di 200 kW, vengono classificate principalmente in utenze prioritarie (UG_Serv_AC_Load1) e utenze ordinarie (UG_Serv_AC_Load2): le prime corrispondono ai servizi indispensabili inerenti al funzionamento della rete metropolitana, quali gli attuatori degli scambi e degli sbarramenti, le segnaletiche, nonché ai servizi indispensabili alla stazione, quali ascensori, tornelli e servizi di sicurezza. Le seconde saranno caratterizzate da costi di interruzione ridotti, quindi in caso di necessità saranno oggetto di distacco intenzionale a salvaguardia delle utenze a priorità maggiore.

Infine, si è ipotizzato che la stazione metropolitana fosse munita di pannelli fotovoltaici (UGS Photovoltaic), installati sul tetto della stazione (UGS_PV1) e presso l'area parcheggio della stessa (UGS_PV2). Entrambi i gruppi di pannelli fotovoltaici sono caratterizzati da una tensione generata di 600 Vdc e una capacità produttiva fino a 50 kW, e afferiscono ad un'unica busbar (UGS_PV_BB); l'energia prodotta viene quindi inviata alla busbar UGS_BB (a 1.5 kVdc) attraverso un apposito convertitore DC-DC (UGS_PV_DC-DC-Conv, 50 kVA). L'impianto di produzione di energia fotovoltaica è inoltre affiancato da un sistema di accumulo mediante batterie (USG_BEES), caratterizzato da una tensione di 600 Vdc e una potenza di targa di 50 kW, e anch'esso collegato alla stessa busbar dell'impianto fotovoltaico (UGS_BB) attraverso un convertitore DC-DC dedicato (UGS_BEES_DC-DC-Conv) da 50 kVA. Il sistema di batterie accumulerà l'eccesso di produzione di energia elettrica generato dal sistema fotovoltaico, avendo la potenziale funzione di garantire la continuità delle utenze di servizio della stazione metropolitana, lavorando come sistema di backup.

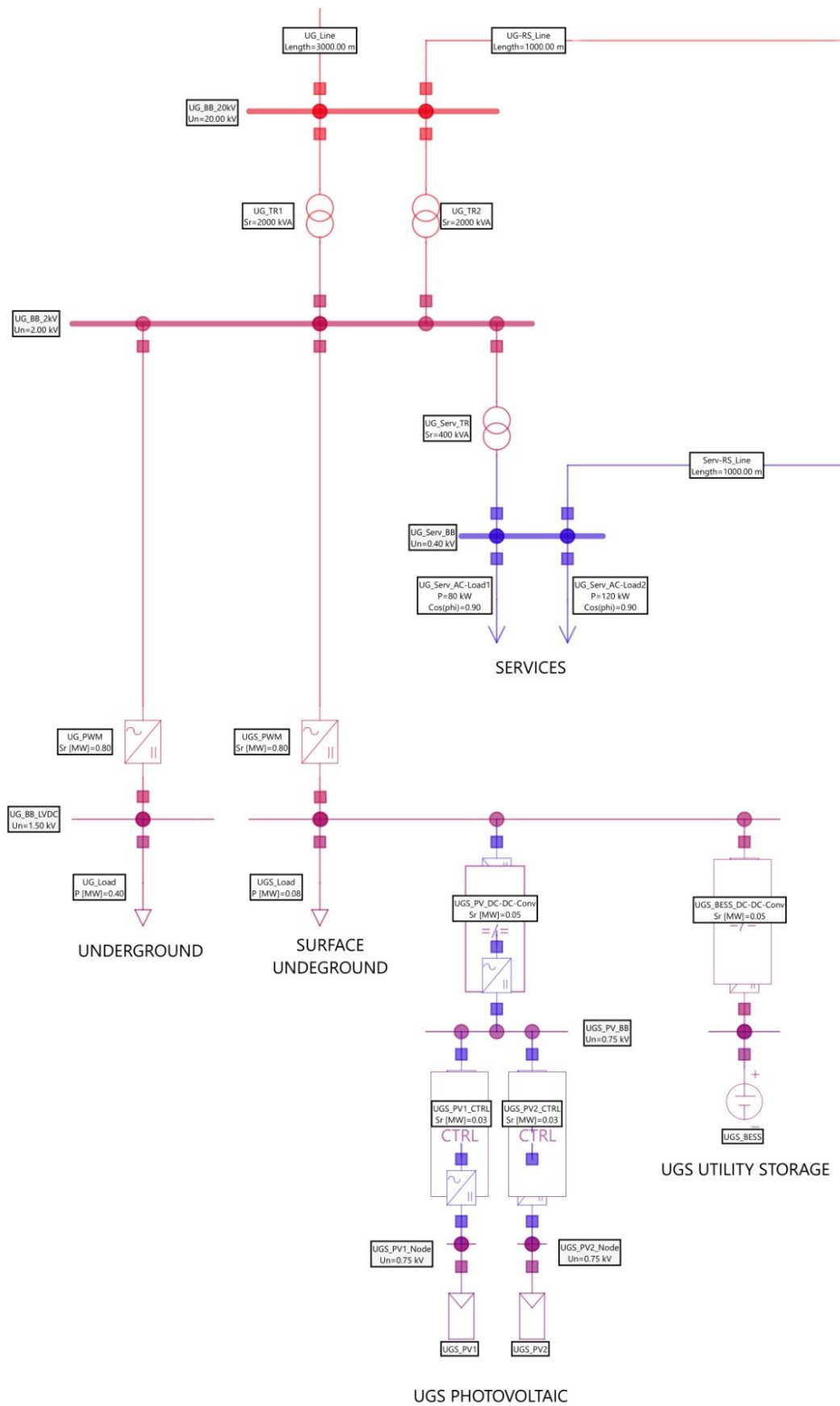


Figura 3. Settore Underground della City Area

1.1.6 Configurazione di rete del settore Servizi stradali (Road Services)

La rete dei servizi stradali rappresenta la rete elettrica necessaria ad alimentare i diversi servizi elettrici funzionali al settore viario dell'area cittadina. All'interno di tale sottorete, di cui si riporta la configurazione in Figura 4, sono inclusi il servizio di illuminazione pubblica, i sistemi di regolamentazione del traffico, la cartellonistica elettronica, etc. La sottorete relativa ai Road Services si dirama a partire da una busbar (RS_BB_20kV) connessa direttamente alla busbar principale della City Area; da essa, mediante un trasformatore (RS_TR) da 400 kVA la tensione viene abbassata a 400 Vac sulla busbar da cui si diramano i carichi relativi ai servizi. Anche in tal caso, i carichi si distinguono in prioritari (RS_AC-Load1) e ordinari (RS_AC-Load2), entrambi con una potenza di targa di 100 kW: alla prima categoria appartengono tutti i carichi relativi agli strumenti di regolamentazione del traffico, i servizi per la telecomunicazione, nonché una parte dell'illuminazione stradale, mentre tutte le altre tipologie afferiscono alla seconda categoria.

Accanto ai servizi sopra menzionati, ai servizi stradali appartengono anche le stazioni di ricarica per i veicoli elettrici. Nella rete presente, è stata ipotizzata una stazione di ricarica per i veicoli elettrici, composta da alcune postazioni di ricarica lenta (EV-Charge_Load) e da altre postazioni di ricarica veloce (EV-Fast_Load). Nel dettaglio, sono installate 12 postazioni di ricarica lenta, eroganti una corrente alternata a 230 V, di Tipo 3a da 3.7 kW, per un assorbimento massimo complessivo di 44 kW. Le postazioni di ricarica lenta sono connesse ad una busbar da 400 Vac, che viene energizzata dalla busbar RS_BB_0.4kV attraverso una linea di collegamento. Sono inoltre installate 6 postazioni di ricarica rapida di Tipo 4, capaci di erogare una potenza di 50 kW in corrente continua a 400 Vdc, di cui 3 con standard CCS Combo2 e 3 con standard CHAdeMO. La potenza massima erogabile delle colonnine di ricarica veloce è pari a 300 kW complessivi. Le postazioni di ricarica veloce insistono su una busbar a 600 Vdc (EV-Fast_BB), alla quale sono allacciati attraverso un convertitore DC-DC (EV-Fast_DC-DC-Conv) con potenza di targa 300 kVA. Tale barra è poi energizzata dalla barra RS_BB_0.4kV attraverso un convertitore bidirezionale AC-DC (EV-Fast_PWM) da 400 kVA.

Infine, come anticipato al paragrafo 1.1.2, la stazione di ricarica dispone di una installazione per la produzione di energia elettrica mediante 162 moduli fotovoltaici (EV-Fast_PV) a copertura dei 18 posti auto, per una capacità di produzione pari a 50 kW a 600 Vdc; all'installazione fotovoltaica è poi affiancato un sistema di accumulo a batterie (EV-Fast_PV) con capacità di targa pari a 200 kWh e con una tensione nominale di 600 Vdc. Tale configurazione permette di massimizzare lo sfruttamento delle risorse rinnovabili nelle operazioni di ricarica dei veicoli elettrici: lo storage elettrico associato alla produzione di energia da fotovoltaico permette di accumulare l'eventuale eccesso di produzione da parte dei pannelli fotovoltaici, laddove non fosse richiesto dai caricatori dei veicoli. La potenza accumulata può essere resa disponibile alla rete nel caso in cui la potenza richiesta dalle operazioni di ricarica dei veicoli elettrici fosse inferiore alla produzione fotovoltaica, con l'obiettivo di minimizzare la richiesta di energia elettrica della rete. Sia il sistema di pannelli fotovoltaici che il sistema di accumulo sono collegati direttamente alla busbar EV-Fast_BB.

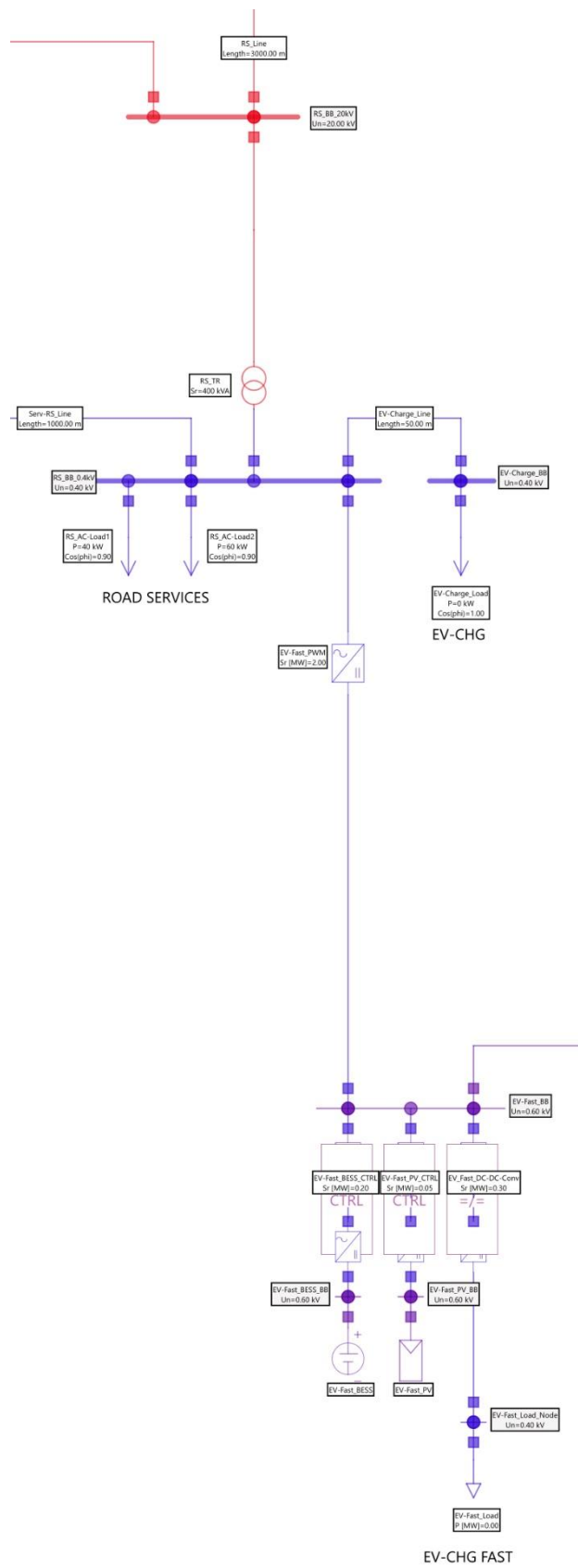


Figura 4. Settore Road Services della City Area

1.1.7 Configurazione di rete del settore Parco Rinnovabili (Wind Park)

L'ultima delle sottoreti della rete della City Area è costituita dalla rete parco rinnovabili (configurazione in Figura 5). Presupponendo che detto parco sia installato a ridosso di un centro commerciale, è verosimile supporre una installazione minieolica (Wind Park), costituita da due impianti eolici (WPG1 e WPG2) con una taglia di 200 kW ognuno. I due impianti trasferiscono la potenza elettrica generata alla busbar WPG_BB2_2kV alla tensione di 2 kVac, a sua volta connessa direttamente alla busbar WPG_BB1_2kV. Quest'ultima poi trasferisce la potenza alla busbar Res-WPG_BB_20kV attraverso il trasformatore WPG_TR da 2 MVA; la stessa è inoltre collegata alla busbar Res_BB (a 400 Vac) attraverso il trasformatore Res/WPG_TR.

Il parco eolico è infine affiancato da un impianto per la generazione fotovoltaica di energia elettrica (WPG_PV) con capacità produttiva 100 kW, affiancato da un sistema a batterie per l'accumulo di energia (WPG_BESS) caratterizzato da una capacità di targa pari a 400 kWh. Entrambe le unità sono operanti a 600 Vdc, e sono coltate sulla medesima busbar WPG_PV_BB. Tale barra è poi collegata alla busbar WPG_BB1_2kV mediante un convertitore AC-DC (WPG_PWM) da 2 MVA.

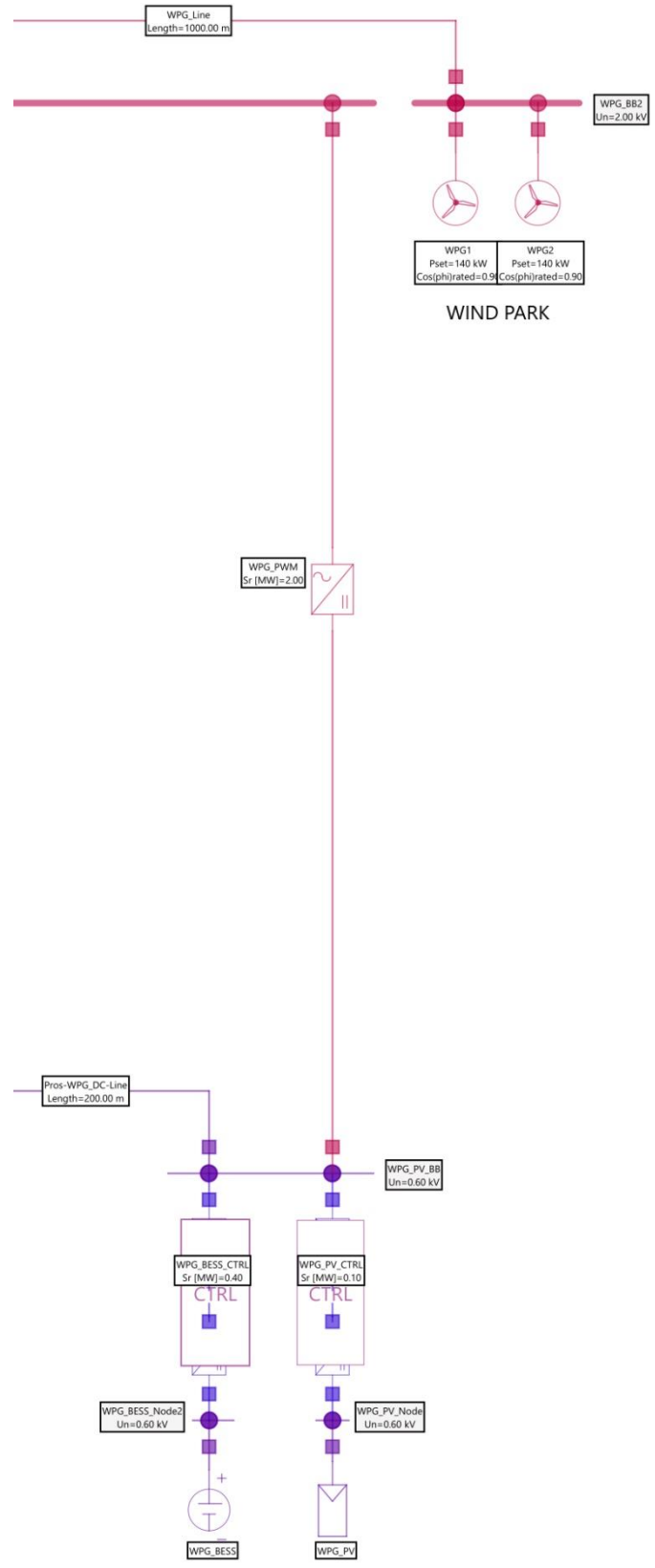


Figura 5. Settore Wind Park della City Area

1.1.8 Interconnessioni tra i settori

Alcuni settori della rete City Area sono interconnessi tra di loro a vari livelli, per aumentare la continuità del servizio.

In particolare, tra settori Underground e Road Services sono stati predisposti dei collegamenti in corrente alternata a due livelli differenti di tensione: una prima connessione a 20 kV tramite linea in configurazione normalmente-chiusa tra le barre UG_BB_20kV e RS_BB_20kV; una seconda connessione a 400 V tramite linea in configurazione normalmente aperta tra le barre UG_Serv_BB e RS_BB_0.4kV. In aggiunta, la barra WPG_BB_2kV (a 2 kV) del parco eolico e la barra Res_BB (a 400 V) del settore residenziale sono connesse tra di loro mediante il trasformatore Res/WPG_TR con contatti normalmente-aperti: tale soluzione permette l'immissione diretta, all'interno del settore residenziale, dell'energia prodotta dal parco eolico, sulla base di considerazioni tecnico-economiche.

Sono previste inoltre delle connessioni tra le porzioni DC della rete, al fine di consentire lo sviluppo di diversi schemi di condivisione delle risorse energetiche rinnovabili [4]. In particolare, le porzioni DC del settore Road Services e Residential sono collegate mediante una apposita linea con contatti normalmente aperti tra le busbar EV-Fast_BB e Pros_BB_DC1, entrambe a 600 Vdc. Il settore Residential è inoltre collegato al settore Wind Park mediante una linea con contatti normalmente-aperti che connette la busbar Pros_BB_DC2 con la busbar WPG_PV, anche queste a 600 Vdc.

Tali linee di connessione tra i diversi settori sono tutte dotate di interruttori a controllo remoto, per permettere l'attuazione di procedure di controllo sviluppate nelle LA successive.

1.2 Port Area

Il trasporto marittimo svolge un ruolo chiave nel commercio internazionale, in quanto oltre l'85% del volume mondiale di merci avviene via mare. In questo ambito, tuttavia, la maggior parte dei vettori navali utilizza combustibili fossili per la propulsione e per i servizi di bordo, con conseguente emissione di gas inquinanti, particolato e gas serra. Come conseguenza, si generano diverse problematiche di tipo ambientale e di salute. Al fine di ridurre il grado di inquinamento atmosferico ed ottemperare alle normative ambientali internazionali, è stato fissato un obiettivo per la riduzione del 50% dei gas a effetto serra emessi dalle navi entro il 2050 [5]. Per raggiungere tali obiettivi, è necessaria una ristrutturazione del settore che coinvolge sia la tecnologia navale (propulsione e servizi) sia le infrastrutture portuali. In tal senso, risulta fondamentale il ricorso alla generazione da fonti di energia rinnovabile "locali", come il solare fotovoltaico, l'eolico ed i sistemi di accumulo e la loro integrazione in microreti locali. Tali considerazioni hanno indotto a considerare le microreti portuali come un interessante caso studio da sviluppare nell'ambito del presente progetto e da integrare, successivamente, come modello benchmark nel tool sviluppato nella linea di attività LA 1.16.

A valle di una approfondita analisi bibliografica [6]-[9] volta a identificare, come nel caso della City Area, un modello di rete ibrido idoneo a condurre gli studi di affidabilità richiesti dal progetto, è stata definita la configurazione riportata in Figura 6. La Port Area, in particolare, intende proporre la modellazione di una rete elettrica di un porto di medie dimensioni dotato di facility di moderna concezione (es. impianti a fonti rinnovabili, presenza di facility per fornire la connessione diretta alla rete per le utenze di una nave da crociera di medie dimensioni, possibilità di ricaricare gli accumulatori di corrente presenti a bordo delle navi, etc.).

Così come la City Area, anche la Port Area è suddivisa in settori, come di seguito elencato e più approfonditamente descritto nel prosieguo del paragrafo:

- parco di generazione eolica (Wind Generation);
- settore destinato ai servizi portuali e di attracco (Services);
- settore destinato alla movimentazione merci (Handling Machines);
- settore destinato alla ricarica delle batterie delle navi (BESS Charging).

1.2.1 Generazione da fonti rinnovabili nella Port Area

Le aree portuali richiedono grandi potenze installate (ordine dei MW) in spazi relativamente limitati su superficie terrestre. In tal senso, si prospetta nell'immediato futuro un crescente ricorso ad impianti eolici offshore, che consentono lo sfruttamento delle zone adiacenti la costa. Recentemente, questo tipo di impianti ha riportato un rapido sviluppo tecnologico unitamente alla sensibile riduzione d'investimento per MW d'installazione grazie ai numerosi vantaggi rispetto agli impianti di tipo onshore (es. maggiore velocità del vento in mare aperto, limitata disponibilità di terra utile agli impianti, maggiore facilità di installazione di strutture molto grandi, etc.) [10]-[11]. Alla luce di tali considerazioni, si è stabilito di integrare nella microrete portuale, 40 MW di eolico offshore. Non si è ritenuto utile il ricorso ad altre fonti rinnovabili marine (es. quelle derivanti dallo sfruttamento dell'energia cinetica delle maree, del moto ondoso, e dell'entalpia termica oceanica), per il TRL realizzativo ancora abbastanza ridotto. Parimenti, non si è fatto ricorso a fonti quali il solare a concentrazione (CSP) o il geotermico, per gli ingombri non compatibili con le aree portuali nel caso del CSP e la maggiore specificità territoriale in termini di convenienza economica della fonte geotermica.

In considerazione della presenza di diverse aree disponibili in zona portuale altrimenti non utilizzabili, è stata prevista l'installazione di alcuni impianti di generazione fotovoltaica a servizio dei sistemi e veicoli per la movimentazione merci (potenza complessiva installata da fotovoltaico: 4.4 MW). Tale soluzione, infatti, è compatibile con le attività portuali di gestione merci in quanto effettuate prevalentemente durante le ore diurne e quindi con particolare disponibilità di energia fotovoltaica. Per analoghe ragioni e nelle stesse aree, sono previste due installazioni di generatori eolici di tipo AC (2.5 MW di potenza nominale complessiva). Una di queste è stata destinata a diretto servizio dei sistemi di ricarica delle batterie per imbarcazioni descritte nel successivo paragrafo. La seconda installazione è stata prevista a diretto servizio della rete elettrica e si aggiunge al parco eolico offshore, di taglia maggiore. Tale soluzione contribuisce a ridurre la richiesta energetica prelevata dalla rete di distribuzione permettendo, in talune condizioni, l'immissione in rete della generazione energetica in eccedenza.

In accordo a quanto descritto nel rapporto tecnico Report RdS/PTR2020/001, la Tabella 5 riporta il dettaglio delle potenze inerenti alle installazioni considerate nel presente rapporto tecnico.

Tabella 5. Dettaglio delle installazioni di impianti di generazione da fonti rinnovabili della Port Area

<i>Nome</i>	<i>Settore</i>	<i>Tipologia</i>	<i>V_n</i>	<i>P_n</i>
WPG1	ON-SHORE WIND PARK	Eolico	0.69 kVac	2.5 MW
WPG2	OFF-SHORE WIND PARK	Eolico	2 kVdc	40 MW
On-Shore_WPG	DC POWER SYSTEM	Eolico	0.69 kVac	1 MW
PV1	PV PARK 1	Fotovoltaico	1.5 kVdc	2 MW
PV2	PV PARK 2	Fotovoltaico	1.5 kVdc	2 MW
EV2_PV	EV CHARGING STATION 2	Fotovoltaico	0.69 kVdc	0.4 MW

1.2.2 Sistemi di accumulo a servizio della Port Area

Il sistema di accumulo attualmente più adoperato risulta essenzialmente quello elettrochimico (accumulatori al piombo e a ioni litio). La letteratura tecnica stima che, nell'immediato futuro, imbarcazioni e autoveicoli di servizio nelle aree portuali dovranno migrare verso la propulsione elettrica. Già ad oggi, diverse imbarcazioni per il trasporto merci utilizzano la propulsione elettrica e sono equipaggiate con container di batterie, modulari e rimovibili, che vengono caricate sulle banchine dei porti. In alcuni casi, il caricamento avviene in maniera diretta dalla stazione di ricarica, in altri per sostituzione delle batterie, ovvero l'imbarcazione cede il sistema di stoccaggio scarico nel porto e acquisisce quello carico. È evidente, quindi, che con l'affermarsi di questo modello, l'area portuale sarà dotata di un sistema di accumulo elettrochimico che potrebbe essere

adoperato anche per i servizi ausiliari del porto non direttamente riconducibili alle necessità di movimentazione in mare. Pertanto, nelle infrastrutture portuali sarà richiesta una adeguata disponibilità di stoccaggio elettrico, tale per cui sono stati previsti due distinti sistemi di accumulo elettrochimico. In tal senso il modello proposto prevede due stazioni per la ricarica e gestione delle batterie delle navi, delle quali una opera direttamente una ricarica a bordo (on-board/plug), e l'altra a terra (on-shore), caratterizzate da un utilizzo in termini di potenza e tempi differenti tra loro. È prevista, inoltre, la presenza di un ulteriore sistema di accumulo più specificatamente inerente alle esigenze di continuità di servizio dei mezzi di movimentazione portuale, laddove si presentino prolungati tempi di indisponibilità di energia elettrica da parte della rete pubblica.

Il dettaglio delle stazioni di ricarica dei veicoli elettrici è riportato in Tabella 6.

Tabella 6. Dettaglio delle stazioni di ricarica della Port Area

<i>Nome</i>	<i>Settore</i>	<i>Tipologia</i>	<i>V_n</i>	<i>P_n</i>	<i>Cap.</i>
EV1_BEES	EV CHARGING STATION	BEES	0.69 kVdc	0.5 MW	1 MWh
On-Board_PWR	ON-BOARD DC POWER SYSTEMS	BEES	0.69 kVdc	3 MW	⁻¹
On-Shore_PWR	ON-SHORE DC POWER SYSTEMS	BEES	0.69 kVdc	3 MW	⁻¹

1.2.3 Stazioni di ricarica nella Port Area

All'interno delle aree portuali si è pensato inizialmente di considerare una sensibile presenza sia di imbarcazioni leggere elettriche di tipo plug-in e sia di veicoli elettrici terrestri, come navette a servizio passeggeri, mezzi per la movimentazione merci, autoveicoli per il personale di servizio nonché auto private. Al fine di garantire un adeguato sistema di ricarica per tali servizi, è stata pertanto prevista la presenza di due stazioni dislocate in differenti aree della zona portuale. Tali impianti dispongono di punti di ricarica sia per tipologia AC (tipo 2) e sia DC (tipo 4) per venire incontro alle differenti tecnologie plug-in attualmente disponibili sul mercato.

Il dettaglio delle stazioni di ricarica dei veicoli elettrici è riportato in Tabella 7

Tabella 7. Dettaglio delle stazioni di ricarica della Port Area

<i>Nome</i>	<i>Settore</i>	<i>Tipologia</i>	<i>V_n</i>	<i>P_n</i>
EV1-Fast	EV CHARGING STATION 1	TIPO 4	0.4 kVdc	1.0 MW
EV1-Boat	EV CHARGING STATION 1	TIPO 4	0.4 kVdc	1.0 MW
EV1-Charge	EV CHARGING STATION 1	TIPO 2	0.4 kVac	0.6 MW
EV2-Fast	EV CHARGING STATION 2	TIPO 4	0.4 kVdc	1.0 MW
EV2-Boat	EV CHARGING STATION 2	TIPO 4	0.4 kVdc	1.0 MW
EV2-Charge	EV CHARGING STATION 2	TIPO 2	0.4 kVac	0.6 MW

1.2.4 Configurazione di rete della Port Area

Il modello di rete dell'area portuale (Port Area) prevede complessivamente 10 punti di carico, distribuiti nei settori Services, Handling Machines e BEES Charging (Figura 6). Tali punti di carico, operanti sia in corrente alternata che in corrente continua, sono caratterizzati da un assorbimento complessivo di circa 41.2 MW, la maggior parte delle quali afferente al settore delle movimentazioni merci, che dispone di un assorbimento nominale di 20 MW; un'altra aliquota cospicua dell'assorbimento nominale è attribuita ai servizi di alimentazione delle imbarcazioni attraccate, e dell'insieme dei servizi portuali, che sono responsabili di un

¹ Valore dipendente dal sistema di accumulo specifico installato sulla nave

assorbimento nominale di 12 MW. I servizi di ricarica dei veicoli elettrici, distribuiti su due piattaforme diverse, e divisi in ricarica lenta dei veicoli, ricarica rapida dei veicoli, e ricarica rapida delle imbarcazioni, presenta una capacità di carico di 2.6 MW per ogni piattaforma, mentre i servizi di ricarica delle batterie delle imbarcazioni hanno una capacità di ricarica fino a 4 MW. Il dettaglio dei punti di carico della Port Area è riportato nella Tabella 8.

Tabella 8. Dettaglio dei punti di carico della Port Area

<i>Nome</i>	<i>Settore</i>	<i>Tipologia</i>	<i>V_n</i>	<i>P_n</i>
Vessel_Load	SERVICES	Carico	6.0 kVdc	10 MW
Services_Load	SERVICES	Carico	6.0 kVdc	5 MW
HM1_Load	HANDLING MACHINES	Carico	6.0 kVac	5 MW
HM2_Load	HANDLING MACHINES	Carico	6.0 kVac	5 MW
EV1-Charge	BESS CHARGING	EV-Charge	400 Vac	0.6 MW
EV1-Fast	BESS CHARGING	EV-Charge	400 Vdc	1 MW
EV1-Boat	BESS CHARGING	EV-Charge	400 Vdc	1 MW
EV2-Charge	BESS CHARGING	EV-Charge	400 Vac	1 MW
EV2-Fast	BESS CHARGING	EV-Charge	400 Vdc	1 MW
EV2-Boat	BESS CHARGING	EV-Charge	400 Vdc	0.6 MW

La rete esterna deve quindi garantire alla Port area una potenza elettrica di 41.2 MW, che si suppone provenga da impianti di generazione elettrica centralizzata (centrali termo-elettriche, idroelettriche, geotermiche e bio-combustori). In accordo con quanto riportato nel report tecnico Report RdS/PTR2020/001, inerente alla distribuzione delle generazioni rinnovabili in Italia censite nell'anno 2020, il rapporto tra la potenza nominale delle installazioni di generazione fotovoltaica e la potenza delle installazioni centralizzate è pari al 23.2%, mentre il rapporto tra la potenza nominale delle installazioni di generazione da energia eolica rispetto alle installazioni centralizzate è dell'11.9%. Sulla base di tali stime, e rimarcando che gli impianti di generazione fotovoltaica distribuita rappresentano circa il 50% della generazione fotovoltaica complessiva, la rete della Port Area prevede diverse installazioni fotovoltaiche per una potenza nominale complessiva di 4.3 MW. In particolare, sono state previste 2 aree dedicate alle installazioni fotovoltaiche (PV Park1 e PV Park2), ognuna della quale costituita da circa 4000 pannelli fotovoltaici da 500 W, con una capacità complessiva ognuna di 2 MW. In aggiunta, in prossimità di una stazione di ricarica dei veicoli elettrici, è stata prevista l'installazione di circa 1000 pannelli fotovoltaici a copertura sia delle postazioni di ricarica auto che delle imbarcazioni elettriche, garantendo così una produzione nominale di 300 kW.

Infine, sono state previste delle installazioni per la generazione di corrente da fonte eolica, una prima installazione on-shore per una capacità produttiva di 2.5 MW, ed una seconda installazione off-shore, molto più estesa, caratterizzata da una capacità nominale di 40 MW.

Anche la Port Area si sviluppa a partire da una busbar principale (Port_BB_Main) a 20 kV, che si divide poi in 3 barre secondarie anch'esse a 20 kV (Port_WPG_BB_20kV, Port_BB_20kV_1 e Port_BB_20kV_2). Di queste, la prima e la terza sono collegate direttamente alla busbar principale, mentre la seconda viene energizzata dalle altre due mediante due linee di collegamento dedicate, con switch in configurazione normalmente-chiuso.

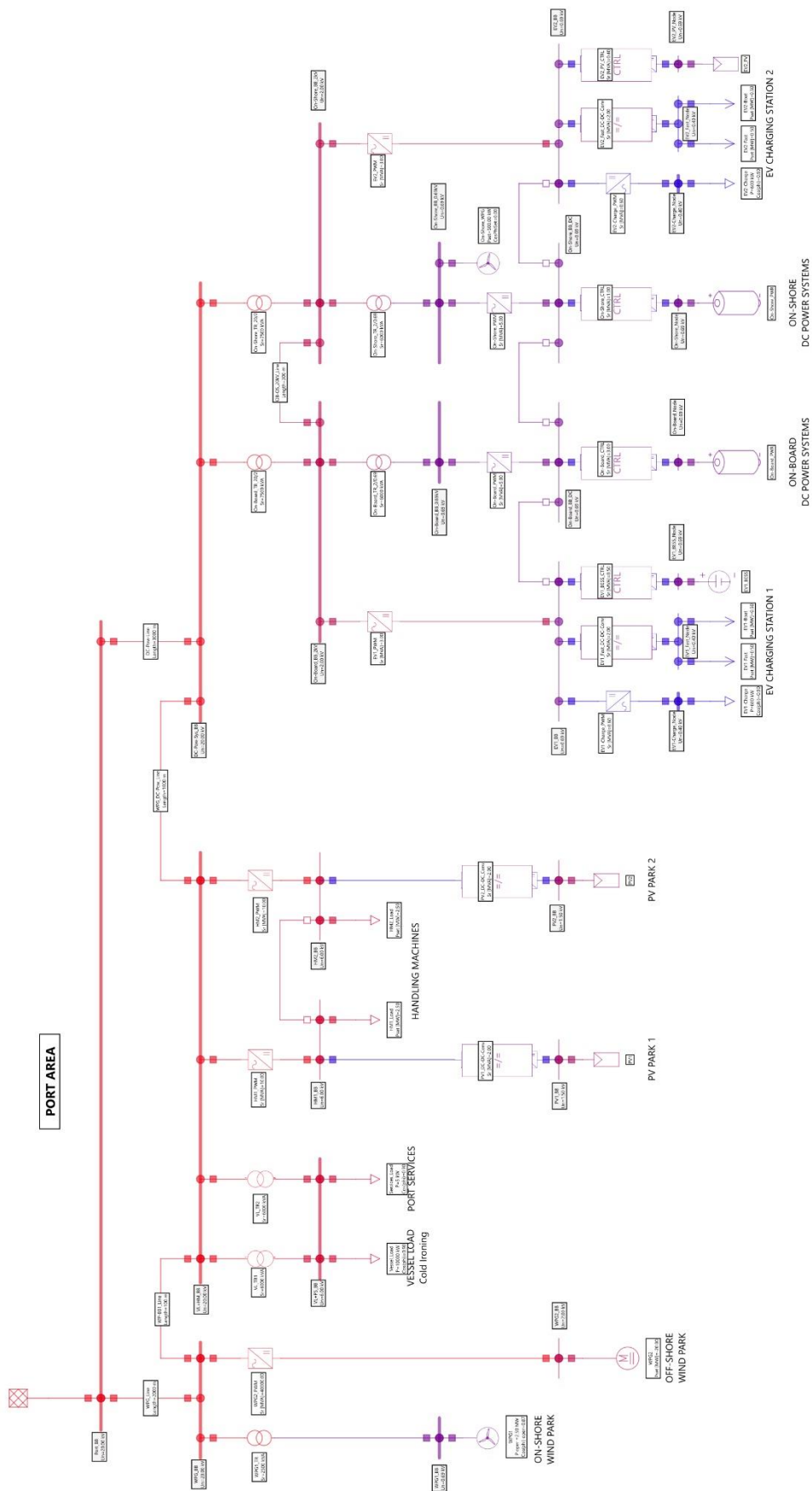


Figura 6. Modello della Port Area

1.2.5 Configurazione di rete del settore Services

La zona portuale prevede carichi elettrici relativi ai servizi portuali (Port_Services_Load), con potenza massima complessiva di 5 MW, e al servizio di cold ironing delle navi, ossia l'allaccio dei carichi delle navi ormeggiate (Port_Vessel_Load) per una capacità massima di erogazione di 10 MW.

Il cold ironing è un processo che permette lo spegnimento dei motori navali durante l'ormeggio in porto, senza però far venir meno l'erogazione di energia richiesta da essa. Il processo si basa sull'allacciamento dell'imbarcazione alla rete elettrica, così da poter spegnere i motori ed azzerare le emissioni in porto. L'erogazione di energia dalla rete elettrica va ad influire positivamente sulla qualità dell'aria del centro abitato vicino il porto. Inoltre, si riduce l'inquinamento acustico generato dal funzionamento dei motori di bordo.

Sia i carichi relativi ai servizi portuali che i carichi relativi al servizio di cold ironing afferiscono alla medesima busbar (Port_VL+PS_BB_6kV), operante a 6 kV, la quale riceve la potenza necessaria dalla Port_BB_20kV_1 attraverso una coppia di trasformatori AC-AC (Port_VL_TR1 e Port_VL_TR2) da 20 MVA. La porzione di modello di rete relativa al settore Services è riportata in Figura 7.

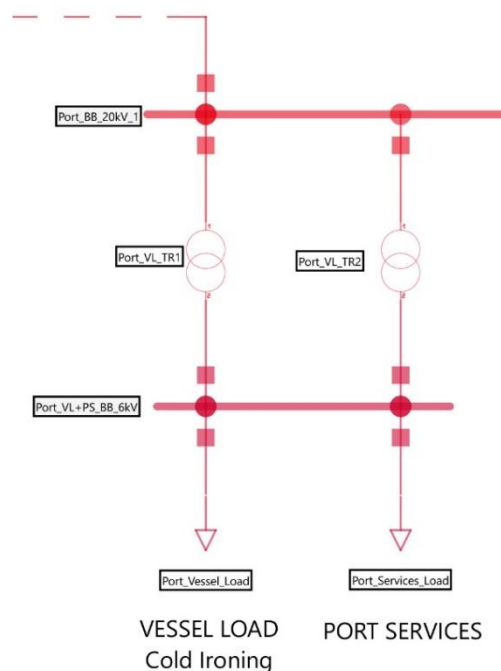


Figura 7. Settore dei Services della Port Area

1.2.6 Configurazione di rete del settore Handling Machines

L'area portuale dispone di un servizio "Terminal Container", ovvero di una struttura atta alla gestione e la movimentazione dei container marittimi per il cambio di modalità di trasporto. Nelle strutture di Terminal Container Marittimi, la movimentazione avviene generalmente tra due diverse navi porta-container, oppure tra una nave portacontainer ed un mezzo terrestre (treni, camion). Esiste inoltre una movimentazione interna (Terminal Container Interno), presenti delle azioni di interporto, in cui la movimentazione può essere

effettuata tra due mezzi terrestri. I terminal container, sia marittimi che interni, sono dotati di una piattaforma di stoccaggio, in cui i container (sia pieni che vuoti) sono conservati per periodi relativamente brevi, in attesa di completare il cambio di mezzo di trasporto. In particolare, i container frigoriferi devono essere collegati a colonnine alimentate elettricamente per garantire la continuità della catena del freddo.

La movimentazione dei container è assicurata da diverse tipologie di mezzi appropriati, spaziando tra i ponti mobili, le gru, altri tipi di movimentazione su rotaia, e da mezzi di movimentazione su ruota.

All'interno del modello di rete (Figura 8), sono stati introdotti due sistemi indipendenti di movimentazione merci (Port_HM1_Load e Port_HM2_Load) operanti in corrente continua a 6 kVdc e caratterizzati da una potenza di targa pari a 5 MW. I due carichi elettrici associati afferiscono a due busbar indipendenti: Port_HM1_BB e Port_HM2_BB; tali barre sono collegate alla seconda busbar secondaria (Port_BB_20kV_1) attraverso 2 distinti convertitori AC-DC (Port_HM1_PWM e Port_HM2_PWM) da 10 MVA. Al fine di garantire una continuità dei servizi del terminal container, le due busbar Port_HM1_BB e Port_HM2_BB sono collegate tra di loro mediante una apposita linea, con interruttori in configurazione normalmente-aperta: tale approccio permette di evitare l'interruzione dei servizi di terminal nel caso uno dei due convertitori AC-DC (Port_HM1_PWM e Port_HM2_PWM), o qualche elemento di connessione relativo ad essi, dovesse subire qualche guasto. Infatti, nel caso di interruzione di servizio di un convertitore, gli interruttori della linea di connessione tra le busbar si chiudono, e l'alimentazione di entrambi i sistemi di handling machines verrà sobbarcata interamente dall'altro convertitore operativo. La soluzione proposta, tuttavia, impone che ognuno dei due convertitori AC-DC debba essere dimensionato in maniera tale da poter sostenere il carico elettrico relativo di entrambi i sistemi di movimentazione merci: essendo questi ultimi caratterizzati da una potenza nominale di 5 MW, ogni sistema di conversione dovrà avere una potenza nominale di 10 MVA.

Al settore delle Handling Machines afferiscono anche due parchi fotovoltaici (PV PARK 1 e PV PARK 2), a sostegno dell'elevata richiesta energetica dei servizi di terminal container. I due parchi eolici sono caratterizzati da una capacità di produzione di energia elettrica pari a 2 MW ognuno, ad una tensione di 1.5 kV. Tale capacità produttiva è assicurata grazie all'installazione, per ogni parco fotovoltaico, di 4000 moduli da 500 W, ricoprendo una superficie di circa 10 000 m². La potenza elettrica generata dalle due installazioni fotovoltaiche è raccolta dalle busbar Port_PV1_BB e Port_PV2_BB, a loro volta connesse alle busbar Port_HM1_BB e Port_HM2_BB attraverso 2 convertitori AC-DC (rispettivamente Port_HM1_DC-DC-Conv e Port_HM2_DC-DC-Conv), caratterizzati da una taglia di 2 MVA.

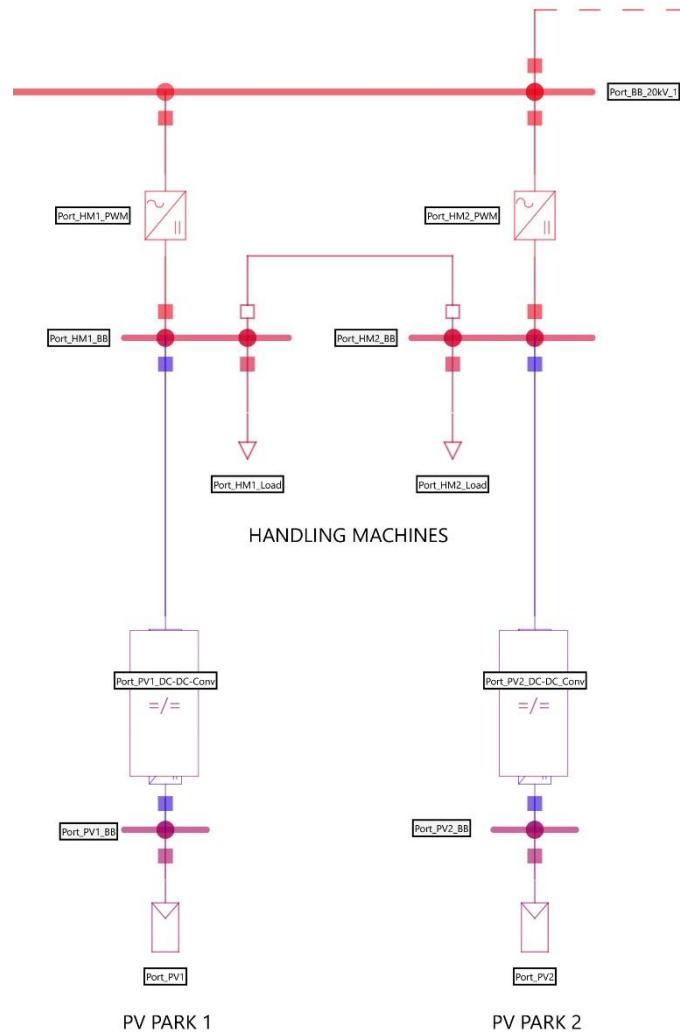


Figura 8. Settore Handling Machines della Port Area

1.2.7 Configurazione di rete del settore Parco Generazione Eolica

In relazione al settore Parco Generazione Eolica, la zona portuale dispone di diverse installazioni di generazione eolica: le principali si generano a partire dalla busbar Port_WPG_BB_20kV, che a sua volta accoglie la generazione elettrica proveniente da una installazione eolica On-Shore, e di una estesa installazione eolica Off-Shore, come si evince dalla configurazione di rete riportata in Figura 9. In particolare, una installazione eolica “tradizionale” di tipo on-shore (Port_WPG1), situata quindi sulla terraferma, trasferisce la sua generazione elettrica ad una busbar (Port_WPG1_BB_0.69kV) in corrente alternata a 690 V; questa poi si connette alla busbar Port_WPG_BB_20kV attraverso il trasformatore Port_WPG_TR da 2.5 MVA.

In aggiunta, è stata considerata anche una installazione eolica di tipo Off-Shore (Port_WPG2): tale impianto, di dimensioni generose, è capace di una produzione nominale di 40 MW in corrente continua, ed è allacciato alla busbar Port_WPG2_BB a 1.5 kV, dalla quale l’energia elettrica prodotta viene convogliata alla Port_WPG_BB_20kV attraverso l’inverter unidirezionale Port_WPG2_PWM da 40 MVA.

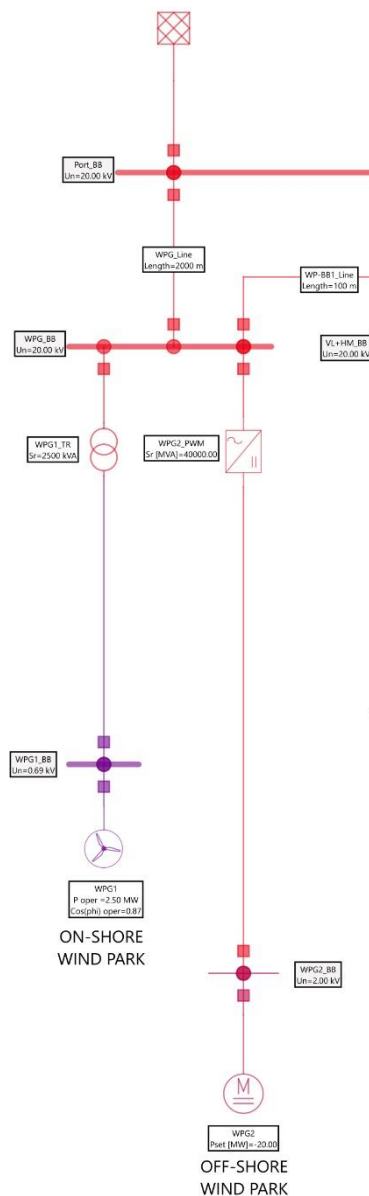


Figura 9. Parco generazione eolica della Port Area

1.2.8 Configurazione di rete del settore BESS Charging

L'area portuale dispone anche, all'interno del settore BESS Charging (Figura 10), di due sistemi differenti per la ricarica dei pacchi batteria delle navi attraccate: la ricarica On-Board (Port_On-Board_PWR) e On-Shore (Port_On-Shore_PWR): l'impianto di ricarica On-Board ha una potenza di targa di 3 MW, mentre l'impianto di ricarica On-Shore ha una potenza di targa di 1 MW. I due impianti di ricarica erogano una corrente continua a 690 Vdc, prelevando la potenza necessaria da due busbar distinte (Port_On-Board_BB_DC e Port_On-Shore_BB_DC). I due sistemi di ricarica sono energizzati dalla terza busbar secondaria (Port_BB_20kV_2), dalla quale la potenza viene trasferita a due barre a 2 kV (Port_On-Board_BB_2kV e Port_On-Shore_BB_2kV) attraverso due trasformatori (Port_On-Board_TR_20/2 e Port_On-Shore_TR_20/2) da 7.5 MVA. La tensione viene ulteriormente ridotta a 690 V attraverso altri due trasformatori (Port_On-Board_TR_2/0.69 e Port_On-Shore_TR_2/0.69) da 6 MVA, alimentando le busbar Port_On-Board_BB_0.69kV e Port_On-Shore_BB_0.69kV. Tali due barre energizzano infine le busbar Port_On-Board_BB_DC e Port_On-Shore_BB_DC attraverso due convertitori AC-DC (Port_On-Board_PWM e Port_On-Shore_PWM) da 5 MVA.

Alla busbar Port_On-Shore_BB_0.69kV è inoltre connessa una installazione eolica (Port_On-Shore_WPG) con potenza totale di 1 MW.

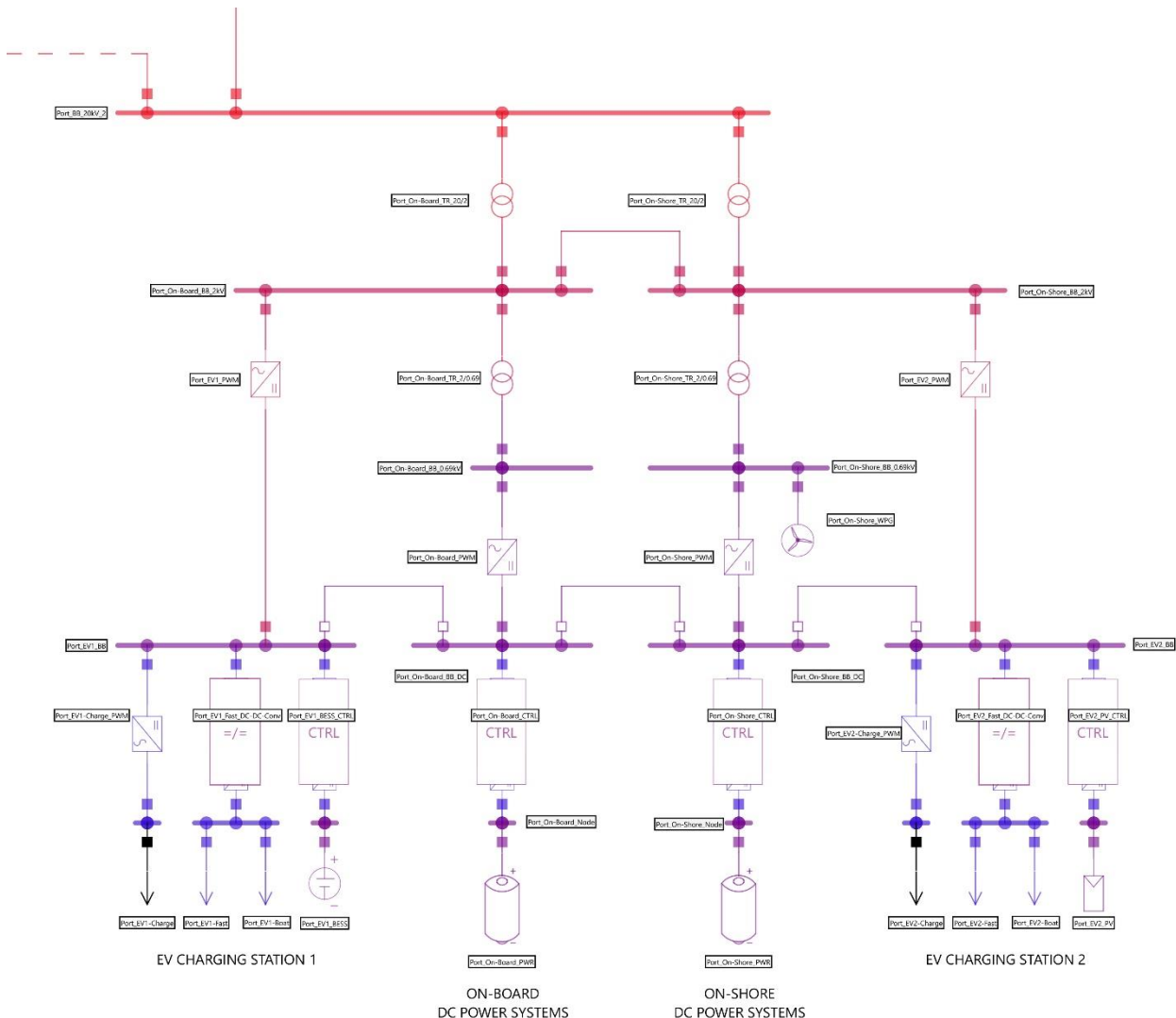


Figura 10. Settore BESS Charging della Port Area

Gli impianti per le ricariche delle batterie a bordo sono affiancati da due stazioni per la ricarica dei veicoli elettrici (EV Charging Station 1 e EV Charging Station 2), sviluppati su due busbar a 690 Vdc (Port_EV1_BB e Port_EV2_BB). Entrambi dispongono di un impianto per la ricarica veloce di Tipo 4 fruibile da 20 auto (Port_EV1-Fast e Port_EV2-Fast); è inoltre prevista la ricarica di 20 imbarcazioni (Port_EV1-Boat e Port_EV2-Boat), con la stessa tecnologia di ricarica. Tali impianti, aventi una capacità di 1 MW ognuno, operano ad una tensione di 400 Vdc, prelevando la potenza richiesta dalle busbar Port_EV1_Fast_Node e Port_EV2_Fast_Node. Tali nodi sono a loro volta connessi alle busbar Port_EV1_BB e Port_EV2_BB attraverso due convertitori DC-DC (Port_EV1_Fast_DC-DC-Conv e Port_EV2_Fast_DC-DC-Conv) da 2 MW ognuno. A tali stazioni di ricarica veloce sono inoltre affiancate anche 2 postazioni di ricarica lenta di Tipo 2 (Port_EV1_Charge e Port_EV2_Charge) ognuna capace di alimentare fino a 30 veicoli; tali punti di connessione erogano ognuno fino a 600 kW in corrente alternata da 230 Vac, e sono energizzati dalle busbar Port_EV1_BB e Port_EV2_BB attraverso due inverter unidirezionali (Port_EV1_Charge_PWM e Port_EV2_Charge_PWM) da 600 kVA.

In aggiunta, la stazione di ricarica EV CHARGING STATION 1 dispone di un sistema di accumulo di energia a batterie (Port_EV1_BESS) da 500 kW, con una tensione nominale di 690 V: il sistema di accumulo risulta capace di garantire una maggiore continuità al servizio di ricarica dei veicoli elettrici.

La stazione di ricarica EV CHARGING STATION 2, invece, è dotata di una piccola installazione di pannelli fotovoltaici (Port_EV2_PV). L'installazione è costituita da 800 moduli da 500 W ognuno, per una capacità di generazione globale di 400 kW, coprendo una superficie globale di circa 1900 m².

Le due stazioni di ricarica EV CHARGING STATION 1 e EV CHARGING STATION 2 sono poi connesse alle busbar Port_On-Board_BB_2kV e Port_On-Shore_BB_2kV mediante due convertitori AC-DC (Port_EV1_BB e Port_EV2_BB) da 3 MVA.

All'interno del settore BESS Charging sono presenti diverse linee di connessione tra le busbar. Inatti, le busbar DC a 690 Vdc sono interconnesse tra di loro mediante apposite linee: in particolare, la barra Port_On-Board_BB_DC è connessa alla barra Port_EV1_BB, mentre la barra Port_On-Shore_BB_DC è connessa alla barra Port_EV2_BB; in aggiunta le barre Port_On-Board_BB_DC e Port_On-Shore_BB_DC sono ulteriormente connesse tra di loro. Tutti gli switch ai capi di tali linee sono in configurazione normalmente-aperto.

2 IMPLEMENTAZIONE DELLE CONFIGURAZIONI DI RETE IN AMBIENTE SIMULATIVO

Al fine di incrementare le potenzialità di utilizzo del software ORAtool, i modelli benchmark sono stati modellati e resi disponibili sia in ambiente di simulazione DigSilent PowerFactory che in ambiente Neplan. Parimenti, verrà garantita la compatibilità con entrambi i software, ovvero l'utente potrà caricare modelli di rete generati sia in formato DigSilent che Neplan. Le procedure seguite per l'implementazione sono di seguito illustrate rispettivamente nei paragrafi 2.1 e 2.2.

2.1 Modello di rete in DigSILENT PowerFactory

DigSILENT Powerfactory è un software per la modellazione, l'analisi e la simulazione di reti elettriche che consente non solo l'analisi delle singole reti ma anche lo studio delle interazioni tra di esse [12].

In questo paragrafo viene descritta la procedura per l'implementazione in DigSilent PowerFactory del benchmark City Area (Figura 11), illustrando le modalità di modellazione per i principali componenti.

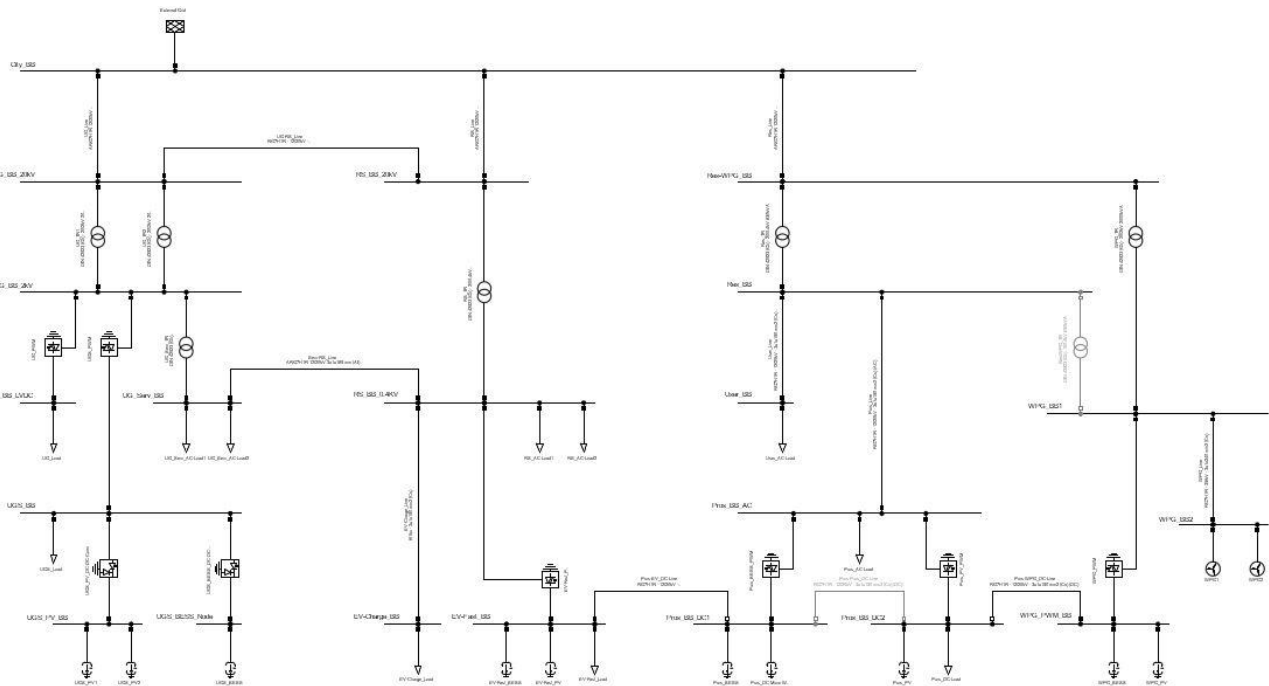


Figura 11. City Area

2.1.1 Rete esterna

La rete esterna è stata rappresentata attraverso l'elemento **External Grid**, impostato come nodo di slack con una tensione operativa pari alla tensione nominale della barra a cui è connessa (Figura 12).

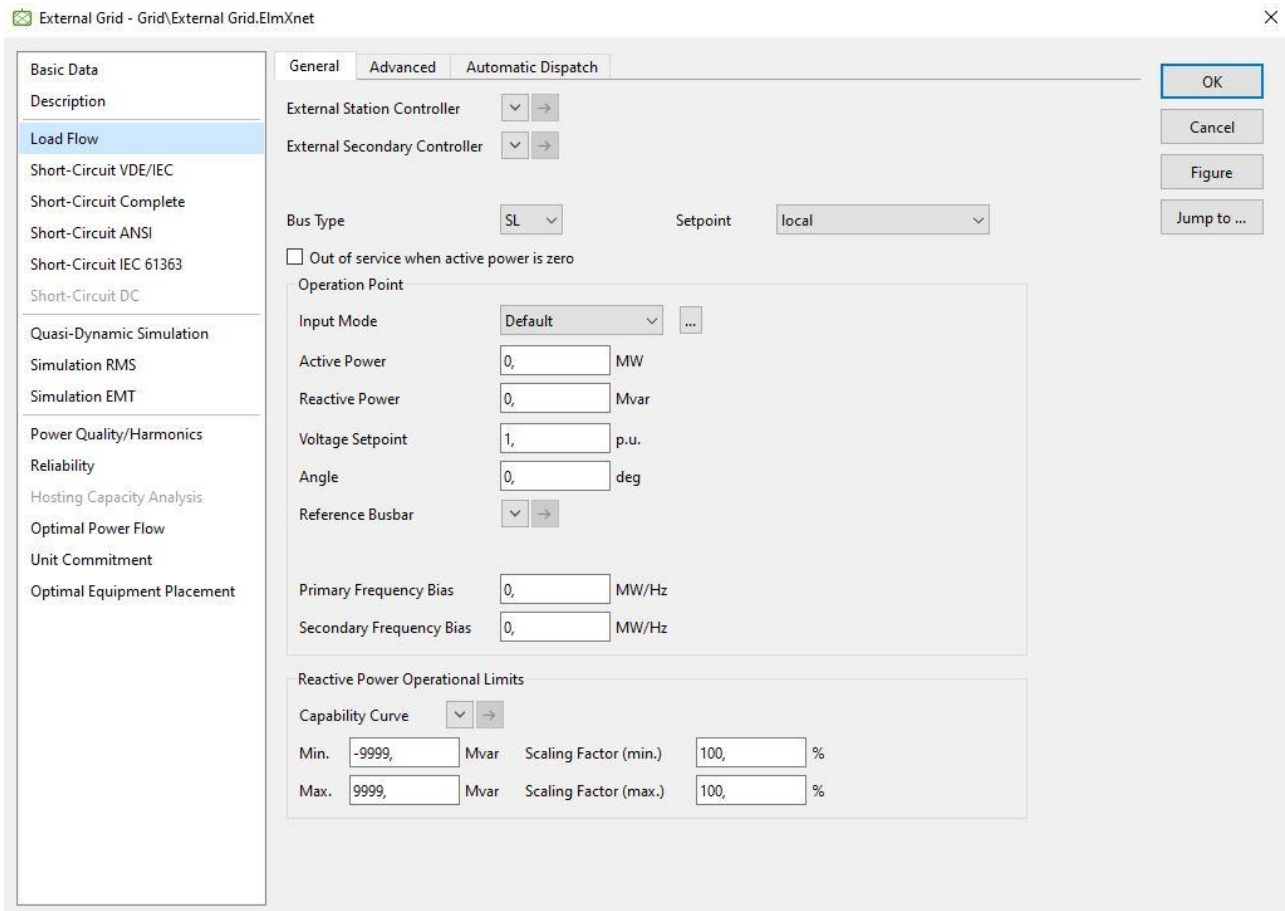


Figura 12. Configurazione dell'elemento External Grid

2.1.2 Busbar

Le BusBar sono state tutte rappresentate attraverso gli elementi ElmTerm presenti in ambiente di simulazione PowerFactory.

2.1.3 Linee di connessione AC e DC

Nel modello di rete implementato sono presenti sia linee AC che DC. Sono presenti due tipologie di linea: ARG7H1R ed RG7H1R. In Tabella 9 sono riportate le principali caratteristiche dei modelli di linea implementati.

Tabella 9. Dettagli degli elementi “Line” della City Area

	R'(AC,20°C) Ohm/km	B' uS/km	C' uF/km	G' uS/km	B0' uS/km	C0' uF/km
Pros-Pros_DC-Line	0,124	84,82301	0,27	0	84,823	0,27
Pros_Line	0,2	84,82301	0,27	0	84,823	0,27
User_Line	0,2	84,82301	0,27	0	84,823	0,27
Serv-RS_Line	0,03	91,10619	0,29	0	91,10619	0,29
EV-Charge_Line	0,02	84,82301	0,27	0	84,823	0,27
UG-RS_Line	0,2	84,82301	0,27	0	84,823	0,27
Pros-WPG_DC-Line	0,124	84,82301	0,27	0	84,823	0,27
Pros-EV_DC-Line	0,124	84,82301	0,27	0	84,823	0,27
RS_Line	0,03	91,10619	0,29	0	91,10619	0,29
Res_Line	0,03	91,10619	0,29	0	91,10619	0,29
UG_Line	0,03	91,10619	0,29	0	91,10619	0,29
WPG_Line	0,0754	91,10619	0,29	0	91,10619	0,29

2.1.4 Trasformatori

Tutti i trasformatori della rete sono stati rappresentati con l'elemento PowerFactory “**ElmTr2**”: per tutti gli elementi del modello è stato scelto il tipo DIN 42523 (Gh) in configurazione 3-phase transformer con wiring Dyn5, mentre la potenza e le tensioni sono state adeguate a seconda del caso. Il dettaglio dei trasformatori è riportato nella Tabella 10.

Tabella 10. Dettagli degli elementi “2W transformer” della City Area

Name	Name	Technology	Potenza Nominale MVA	HV kV	LV kV
RS_TR	DIN 42523 (Gh) - 20/0.4kV 400kVA	Three Phase Transformer	0,4	20	0,4
Res/WPG_TR	DIN 42523 (Gh) - 2/0.4kV 630kVA	Three Phase Transformer	0,63	2	0,4
Res_TR	DIN 42523 (Gh) - 20/0.4kV 630kVA	Three Phase Transformer	0,63	20	0,4
UG_Serv_TR	DIN 42523 (Gh) 400 kVA	Three Phase Transformer	0,4	2	0,4
UG_TR1	DIN 42523 (Gh) - 20/2kV 2000kVA	Three Phase Transformer	2	20	2
UG_TR2	DIN 42523 (Gh) - 20/2kV 2000kVA	Three Phase Transformer	2	20	2
WPG_TR	DIN 42523 (Gh) - 20/2kV 2000kVA	Three Phase Transformer	2	20	2

2.1.5 Convertitori AC-DC

I convertitori AC/DC sono stati rappresentati con l'elemento PowerFactory “**ElmVscmono**”. Per ciascuno dei convertitori sono stati definiti i valori di tensione lato AC, tensione lato DC, potenza nominale. In Figura 13 è riportato un esempio di configurazione di convertitore.

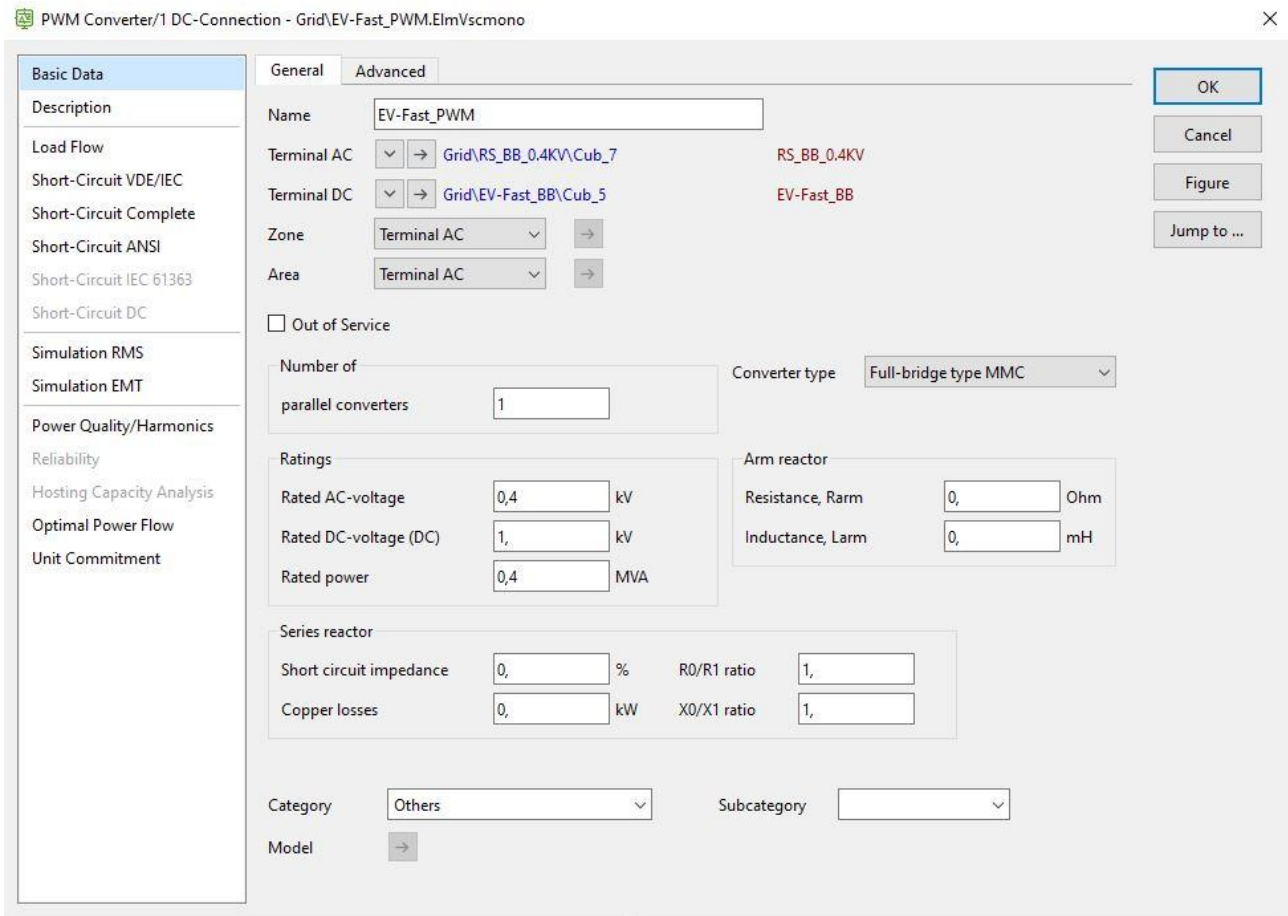


Figura 13. Configurazione dell'elemento PWM

2.1.6 Convertitori DC-DC

Tale componente è stato modellato mediante l'elemento ElmDcdc presente in Powerfactory. Nella rete sono presenti due convertitori DC-DC di tipo Step-down/Step-up bidirezionali. In Figura 14 viene riportata la configurazione implementata.

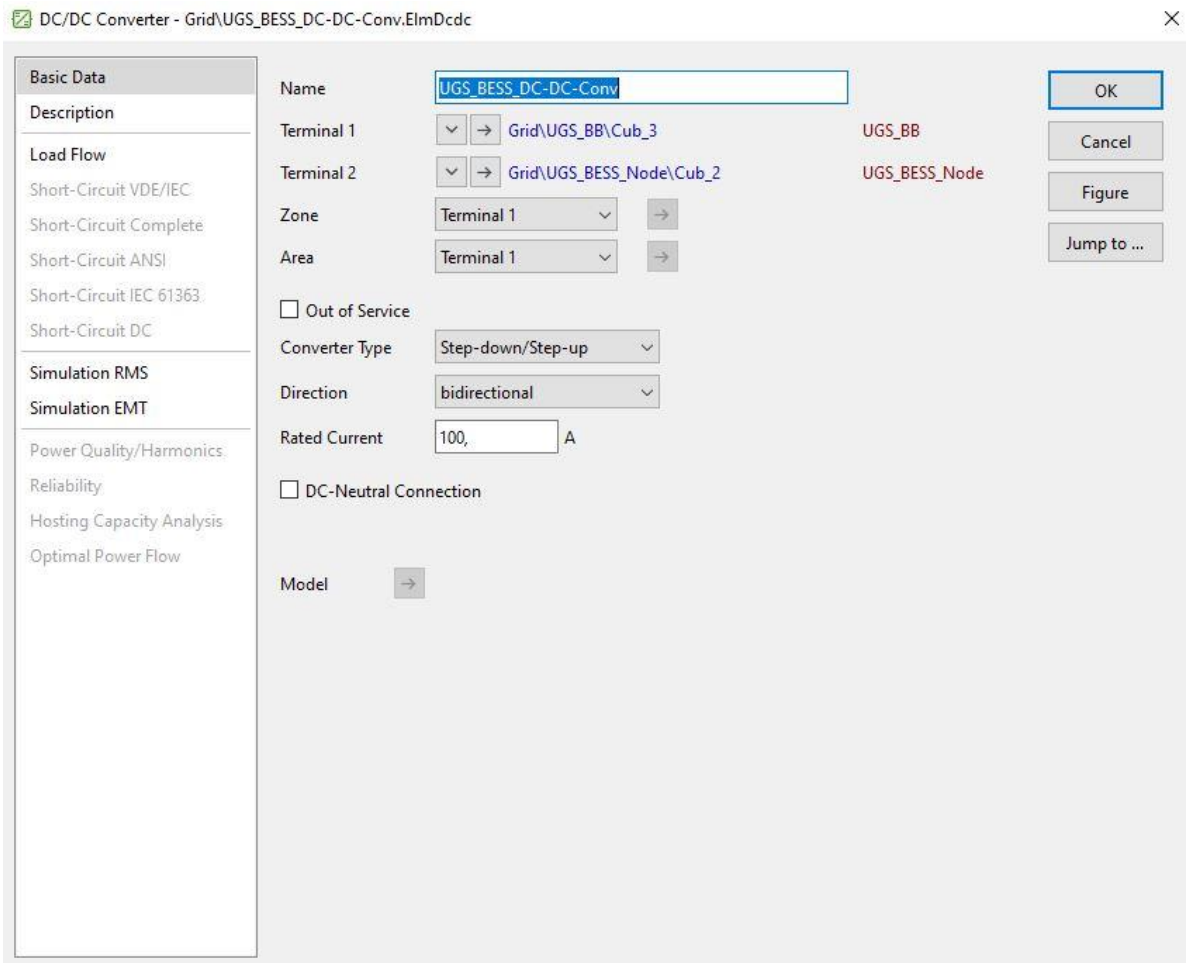


Figura 14. Modello di un convertitore DC-DC nel dettaglio (A) e con maschera (B).

2.1.7 Carichi AC e DC

I carichi presenti in rete sono stati rappresentati dagli elementi ElmLod e ElmLoddc, a seconda del caso. I punti di carico AC sono configurati come carichi trifase (L1L2L3N). In Figura 15 si riporta un esempio di configurazione di carico AC:

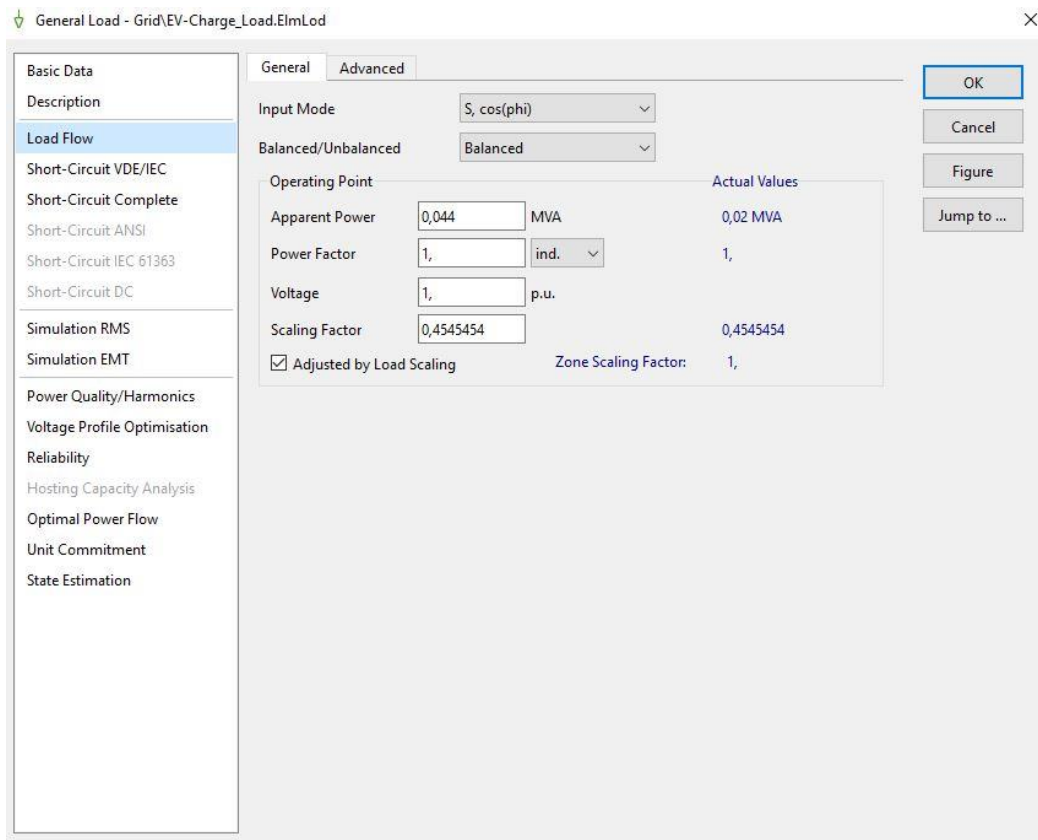


Figura 15. Configurazione carico AC

Per quanto riguarda il carico DC è necessario settare il punto di funzionamento, ovvero la potenza attiva come mostrato in Figura 16.

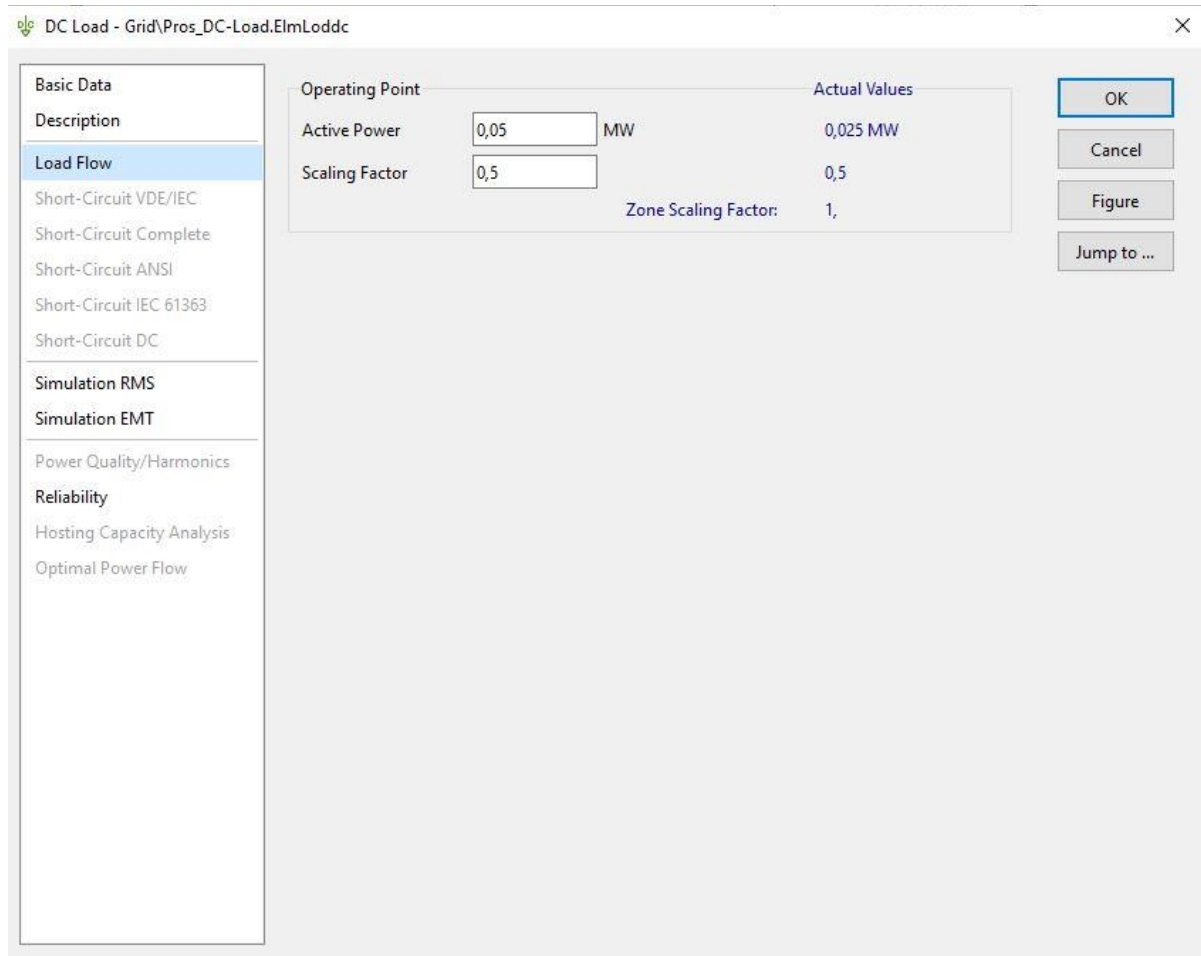


Figura 16. Configurazione carico DC

2.1.8 Generatori eolici AC

Per la rappresentazione dei generatori eolici è stato utilizzato l'elemento ElmGenstat che rappresenta un generatore statico. Per ciascuno dei generatori sono stati settati i necessari punti di funzionamento come mostrato in Figura 17:

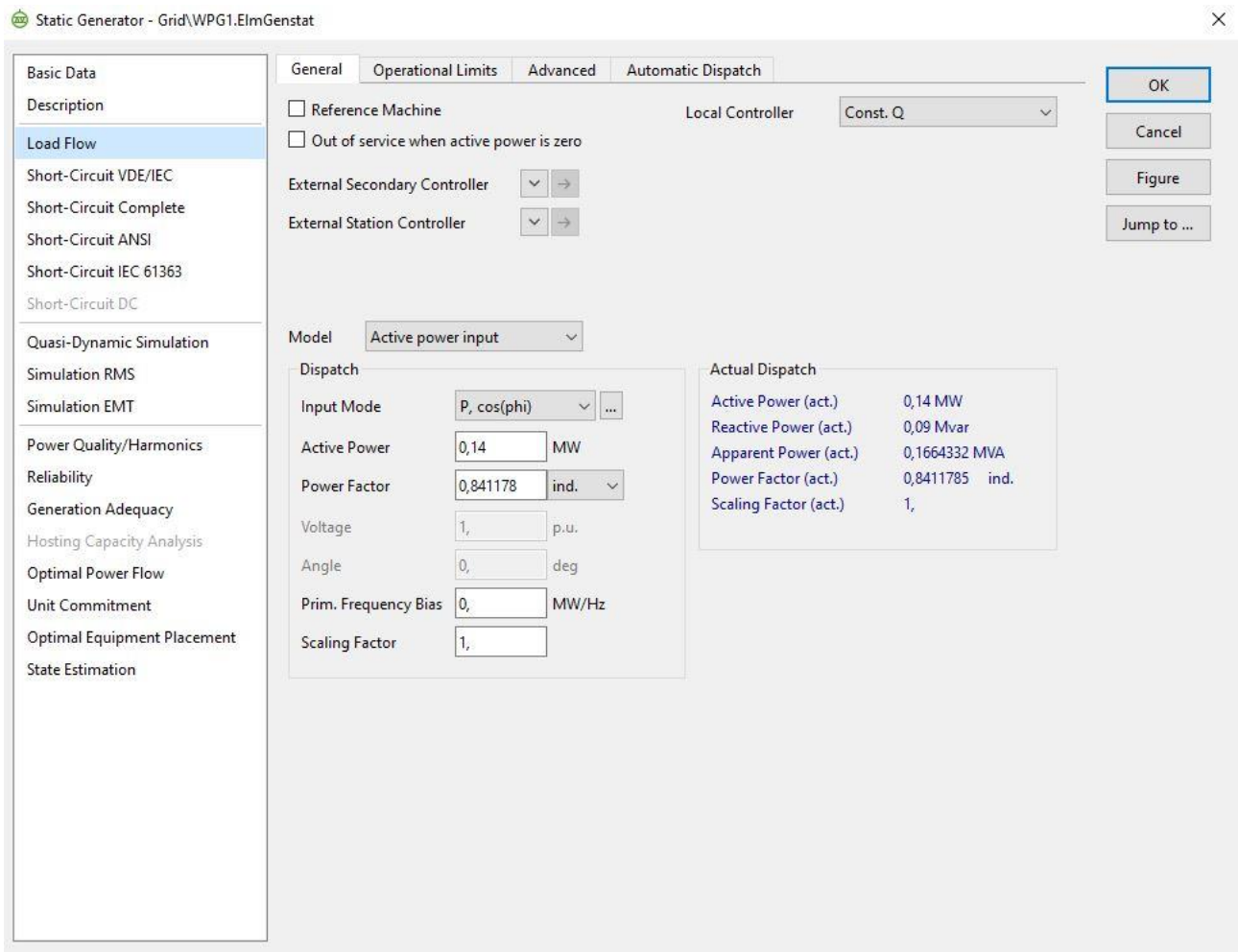


Figura 17. Configurazione generatore eolico

2.1.9 Generatori eolici, micro-eolici DC, generatori fotovoltaici, batterie

Ciascuna risorsa lato DC è stata simulata con un generatore di corrente continua (ElmDci) per il quale è stato necessario definire il valore della corrente nominale come mostrato in Figura 18.

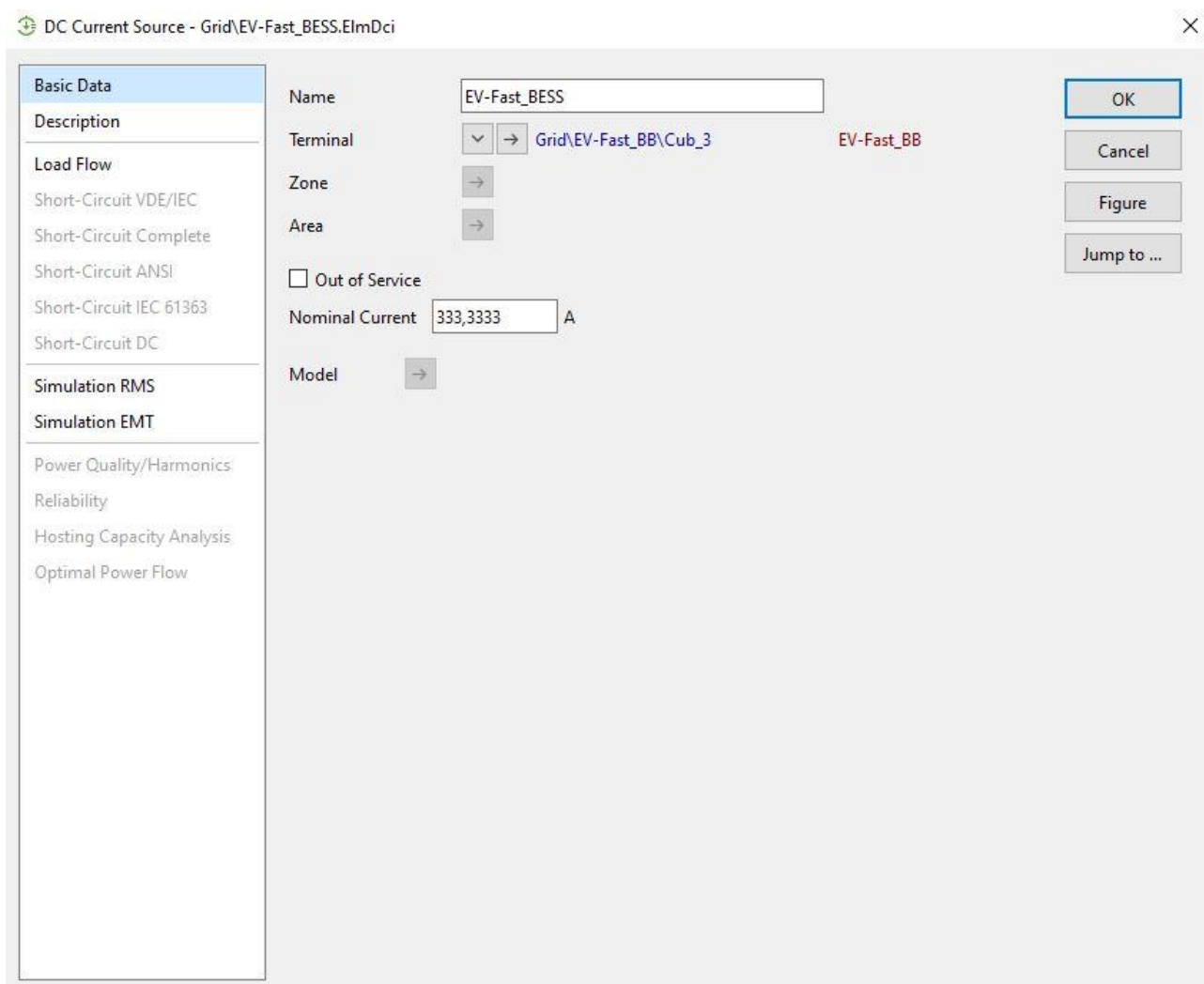


Figura 18. Configurazione risorsa lato DC

2.2 Modello di rete NEPLAN

Nel presente paragrafo, si descrive l'implementazione nell'ambiente di simulazione Neplan delle configurazioni precedentemente progettate e sviluppate.

Il Neplan è uno strumento software di fascia alta per l'analisi dei sistemi di trasmissione, distribuzione, industriale, di energia rinnovabile, e delle smart grid [13]. In linea di massima, il Neplan simula e caratterizza in maniera diretta la maggior parte degli elementi di rete a corrente alternata, mentre allo stato attuale presenta ancora delle limitazioni nella modellazione degli elementi in corrente continua.

La City Area è stata rappresentata in un unico diagramma (Figura 19), in cui sono stati inseriti tutti gli elementi. La rappresentazione grafica è stata effettuata mediante uno sviluppo verticale, in cui ad ogni quota corrisponde un livello di tensione differente. In particolare, sono presenti i seguenti livelli di tensione (disposti dall'alto verso il basso):

- 20 kV AC (ROSSO, spessore grande)
- 2 kV AC (PORPORA, spessore grande)
- 400 V AC (VIOLA, spessore grande)
- 1.5 kV DC (PORPORA, spessore piccolo)

- 750 V DC (PORPORA, spessore piccolo)
- 600 V DC (VIOLA, spessore piccolo)
- 400 V DC (VIOLA, spessore piccolo)

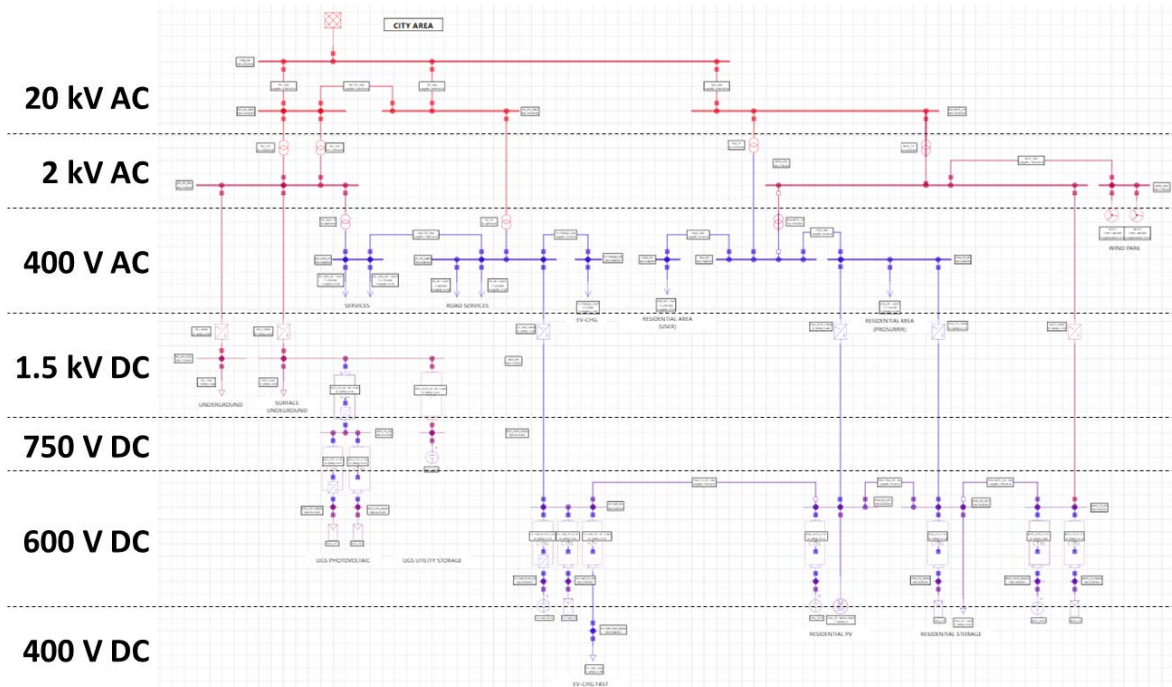


Figura 19. Livelli di tensione della City Area nel modello in Neplan

2.2.1 Rete esterna

La rete esterna è stata rappresentata attraverso l'elemento **External Grid**, impostato come nodo di slack con una tensione operativa pari alla tensione nominale della barra a cui è connessa (Figura 20).

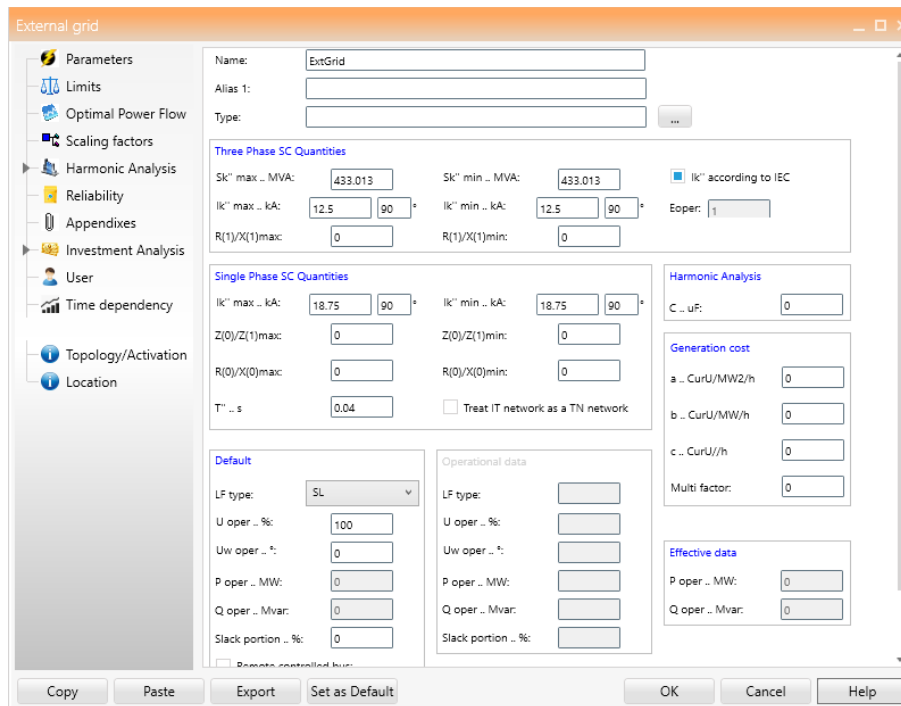


Figura 20. Configurazione dell'elemento External Grid

2.2.2 Busbar

Le BusBar sono state tutti rappresentati attraverso gli elementi **Node** o **DC Node**, a seconda del caso. Per le BusBar AC (Node), è stata imposta una frequenza di 50 Hz.

2.2.3 Linee di connessione AC e DC

Le linee di connessione delle diverse busbar presenti nel modello di rete sono state rappresentate dagli elementi **Line** o **DC-Line**, a seconda del caso. Tutte le linee sono state ipotizzate della tipologia ARG7H1R oppure RG7H1R. In particolare, in Tabella 11 e Tabella 12 sono riportati i dettagli principali di ogni linea.

Tabella 11. Dettagli degli elementi "Line" della City Area

	Tipologia	Lung. (m)	N. Linee	R(1) Q/km	X(1) Q/km	C(1) μF/km	B(1) μS/km	R(0) Q/km	X(0) Q/km	C(0) μF/km	B(0) μS/km	I _r max A
UG_Line	AC ARG7H1R	3000	1	0.164	0.11	0.29	91.1	0.805	0.29	0.29	91.1	361
RS_Line	AC ARG7H1R	3000	1	0.164	0.11	0.29	91.1	0.805	0.29	0.29	91.1	361
Res_Line	AC ARG7H1R	3000	1	0.164	0.11	0.29	91.1	0.805	0.29	0.29	91.1	361
UG-RS_Line	AC RG7H1R	1000	1	0.124	0.11	0.27	84.8	0.776	0.30	0.27	84.8	409
WPG_Line	AC RG7H1R	1000	1	0.075	0.11	0.29	91.1	0.226	0.33	0.29	91.1	361
Serv-RS_Line	AC ARG7H1R	1000	1	0.164	0.11	0.29	91.1	0.805	0.29	0.29	91.1	361
EV-Charge_Line	AC ARG7H1R	50	1	0.164	0.11	0.29	91.1	0.805	0.29	0.29	91.1	361
User_Line	AC RG7H1R	100	3	0.075	0.11	0.29	91.1	0.226	0.33	0.29	91.1	361
Pros_Line	AC RG7H1R	100	3	0.075	0.11	0.29	91.1	0.226	0.33	0.29	91.1	361

Tabella 12. Dettagli degli elementi "DC-Line" della City Area

	Tipologia	Lung. (m)	N. Linee	R Q/km	L mH/km	L mH/km	C μF/km	I _r max A
Pros-EV_DC-Line	AC RG7H1R	200	1	0.124	0.35	0.27	91.1	361
Pros-Pros_DC-Line	AC RG7H1R	20	1	0.075	0.11	0.29	91.1	361
Pros-WPG_DC-Line	AC RG7H1R	200	1	0.075	0.11	0.29	91.1	361

2.2.4 Trasformatori

Tutti i trasformatori della rete sono stati rappresentati con l'elemento **2W transformer**: per tutti gli elementi del modello è stato scelto il tipo DIN 42523 (Gh) in configurazione 3-phase transformer con wiring Dyn5, mentre la potenza e le tensioni sono state adeguate a seconda del caso. Il dettaglio dei trasformatori è riportato nella Tabella 13.

Tabella 13. Dettagli degli elementi "2W transformer" della City Area

	Tipologia	Sr kVA	Ur1 kV	Ur2 kV	URr(1) %	kW(1)	Ukr(1) %	IO(2) %	URr(2) %	kW(2)	Ukr(2) %	IO(2) %
UG_TR1	DIN 42523 (Gh)	2000	20	2	0.93	18.6	6	1.5	0.93	18.6	5.7	0
UG_TR2	DIN 42523 (Gh)	2000	20	2	0.93	18.6	6	1.5	0.93	18.6	5.7	0
Res_TR	DIN 42523 (Gh)	630	20	0.4	1	6.3	6	1.6	1	6.3	5.7	0
WPG_TR	DIN 42523 (Gh)	2000	20	2	1	20	6	1.6	1	20	5.7	0
UG_Serv_TR	DIN 42523 (Gh)	400	20	0.4	1	4	6	1.6	1	4	5.7	0
RS_TR	DIN 42523 (Gh)	400	20	0.4	1	4	6	1.6	1	4	5.7	0
Res/WPG_TR	DIN 42523 (Gh)	630	2	0.4	1	6.3	6	1.6	1	6.3	5.7	0

2.2.5 Convertitori AC-DC

I convertitori AC/DC sono stati rappresentati con l'elemento **PWM** (Figura 21); per tutti gli elementi di questo tipo è stato ipotizzato uno stadio di conversione ideale, supponendo nulli tutti i fattori di perdita (Idle Loss, SW Losses, R), e settando come parametri controllanti:

1. (1st UPFC) la potenza reattiva Q , impostata pari a 0;
2. (2nd UPFC) la tensione della busbar DC a cui è connessa, il cui valore è pari alla tensione nominale della barra DC, ed esplicitando in "Node" la busbar DC a cui si fa riferimento.

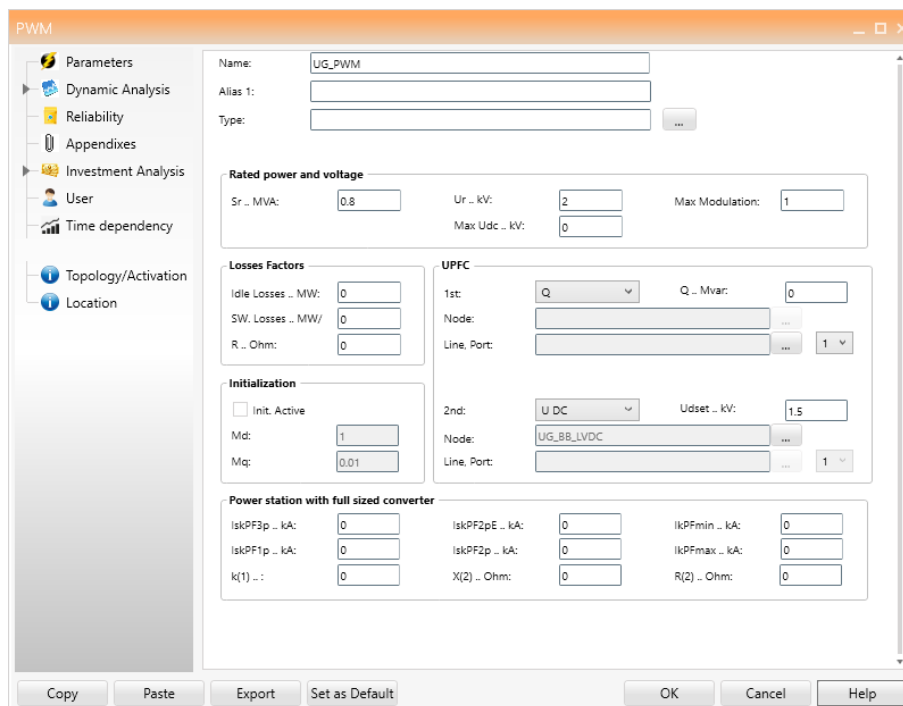


Figura 21. Configurazione dell'elemento PWM

2.2.6 Convertitori DC-DC

I convertitori DC-DC non sono previsti nel Neplan in senso stretto, per cui è stato necessario ricercare una soluzione alternativa per simulare un dispositivo capace di garantire una variazione del livello di tensione DC. Per assolvere a tale funzione, sono stati utilizzati due elementi **PWM** collegati tra di loro dalla parte AC attraverso un nodo (**Node**) (Figura 22). Ovviamente, si ipotizza che delle due busbar DC, una abbia una tensione definita, mentre l'altra avrà il livello di tensione impostato mediante il convertitore DC-DC.

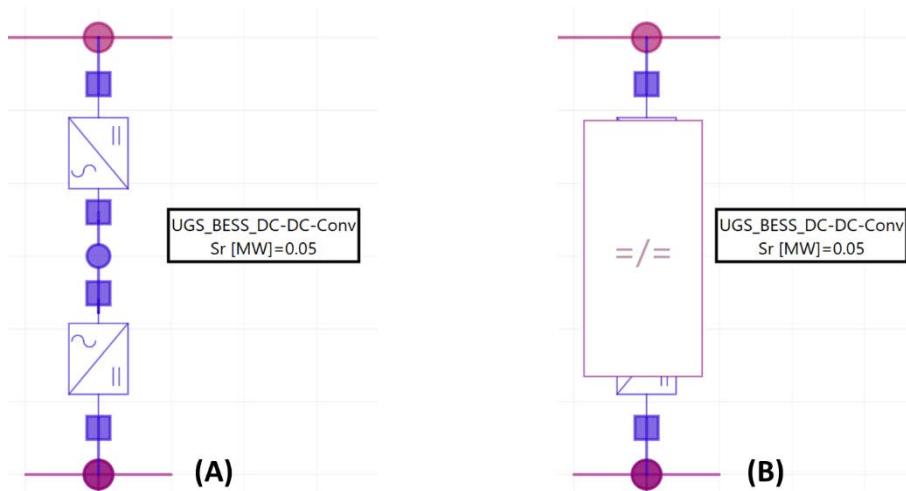


Figura 22. Modello di un convertitore DC-DC nel dettaglio (A) e con maschera (B).

Per una più facile individuazione degli elementi coinvolti, la nomenclatura rispetterà una semantica definita. Ipotizzando che il convertitore si chiami UGS_BESS_DC-DC-Conv, il PWM collegato alla busbar DC primaria (a tensione fissa) avrà la desinenza “_PWM_fake”, per identificare che il suo compito è puramente fittizio: il nome, quindi, sarà UGS_BESS_PWM_fake. Analogamente, il nodo di connessione dei due PWM avrà desinenza “_PWM_node”: il nome sarà UGS_BESS_PWM_node. Infine, il PWM collegato alla busbar di cui si vuole controllare il livello di tensione avrà il nome del convertitore: UGS_BESS_DC-DC-Conv.

Da un punto di vista della configurazione (Figura 23), il PWM fake sarà impostato tale da essere un convertitore ideale (senza perdite di potenza), con potenza di targa (S_r) pari alla potenza del convertitore che si sta simulando, e sarà impostato in modo che i parametri controllanti siano:

1. (1st UPFC) la tensione del nodo AC (nel caso specifico UGS_BESS_PWM_node), il cui livello di tensione sarà pari al valore di tensione massimo applicato al convertitore DC-DC (nel caso in esempio pari a 1.5 kV)
2. (2nd UPFC) la variabile Md di controllo dell'asse di Q, imposta pari a 0.

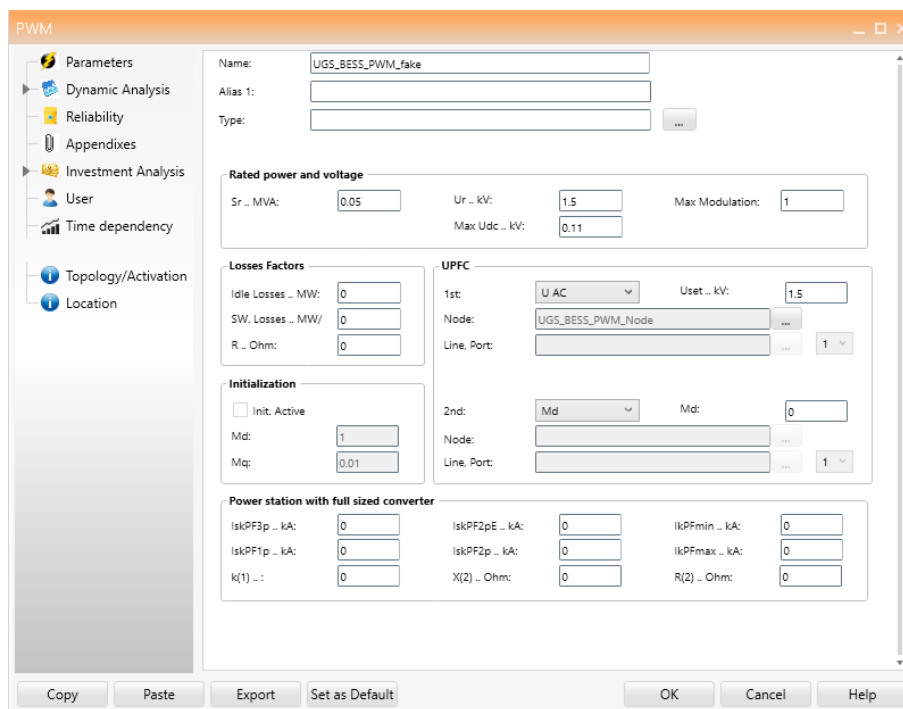


Figura 23. Configurazione dell'elemento PWM fake di un convertitore DC-DC

La busbar PWM_node dovrà ovviamente avere il medesimo valore di tensione impostato nel PWM_fake.

Infine, l'elemento PWM (Figura 24) connesso alla busbar da controllare sarà settato in modo da avere la medesima potenza di targa (S_r) del convertitore DC-DC che si sta simulando, e sarà impostato in modo che i parametri controllanti siano:

1. (1st UPFC) la potenza reattiva Q , impostata pari a 0;
2. (2nd UPFC) il secondo parametro di controllo può essere:
 - a. Se la potenza applicata alla busbar è controllabile direttamente (sono collegati carichi, motori, etc.): tensione della busbar DC a cui è connessa, il cui valore è pari alla tensione nominale della barra DC, ed esplicitando in "Node" la busbar DC a cui si fa riferimento.
 - b. Se il converter deve agire anche come controllore di potenza (perché ad esso è collegato direttamente un accumulatore): la potenza attiva P , impostata pari al valore da prelevare (valore negativo) o da fornire (valore positivo) all'accumulatore (vedi Figura 24).

Ovviamente, quest'ultimo sarà l'elemento controllante del converter: gli eventuali fattori di perdita (Losses Factors), che per gli elementi dei modelli di rete sviluppati sono supposti essere nulli, dovranno essere inseriti in tale elemento.

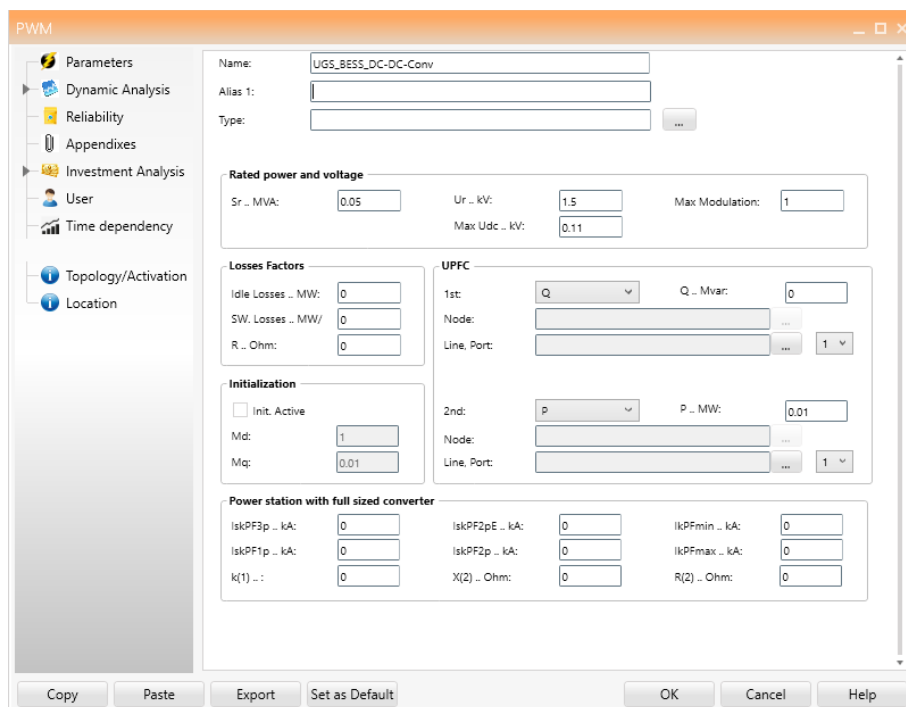


Figura 24. Configurazione dell'elemento PWM controllante di un convertitore DC-DC, con funzione di controllore di potenza.

2.2.7 Punti di carico

I punti di carico presenti nel modello di rete sono stati rappresentati dagli elementi **Load** o **DC-Load**, a seconda del caso. Per una maggiore comprensione all'interno del modello di rete, i carichi AC (Load) sono schematizzati con una freccia a punta aperta (Figura 25-A), mentre i carichi DC sono rappresentati con una freccia a punta chiusa (Figura 25-B).

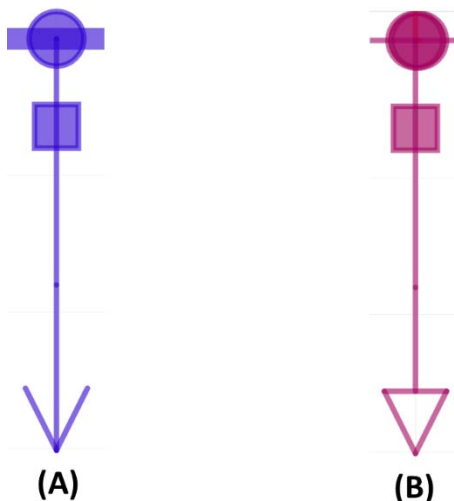


Figura 25. Rappresentazione grafica dei carichi AC (A) e DC (B)

I punti di carico AC sono configurati come carichi trifase (L1L2L3N) con tipologia PC, ovvero settandone la potenza attiva P e la fase $\cos \varphi$; quest'ultima è tipicamente fissata a 0.9 (Figura 26).

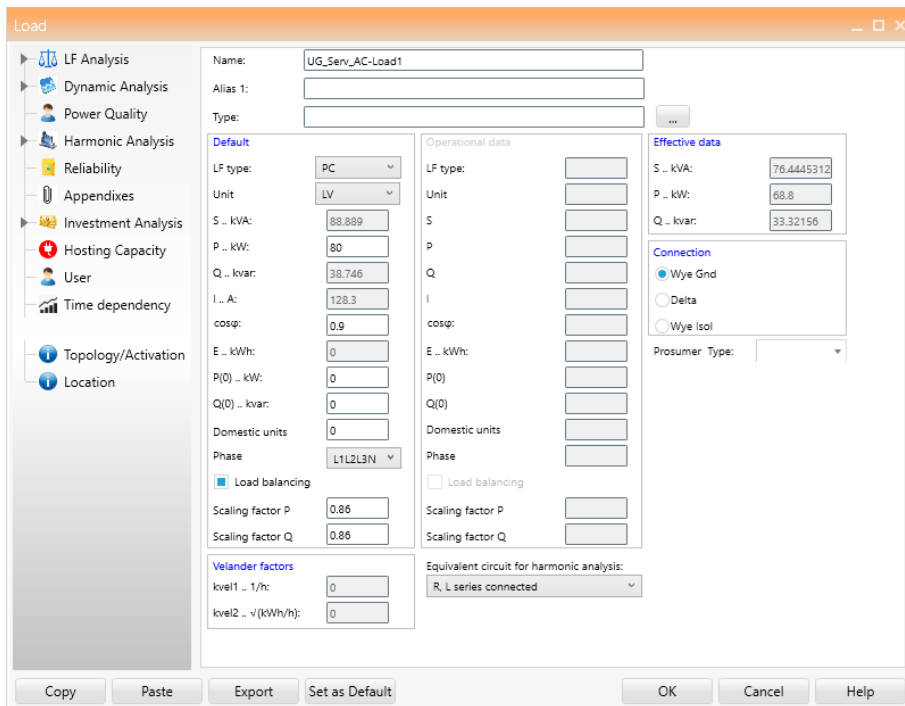


Figura 26. Configurazione dell'elemento Load (punto di carico AC)

I punti di carico DC sono invece configurati con regolazione in potenza (P); i valori di corrente e di impedenza sono stimati dal software di conseguenza (Figura 27).

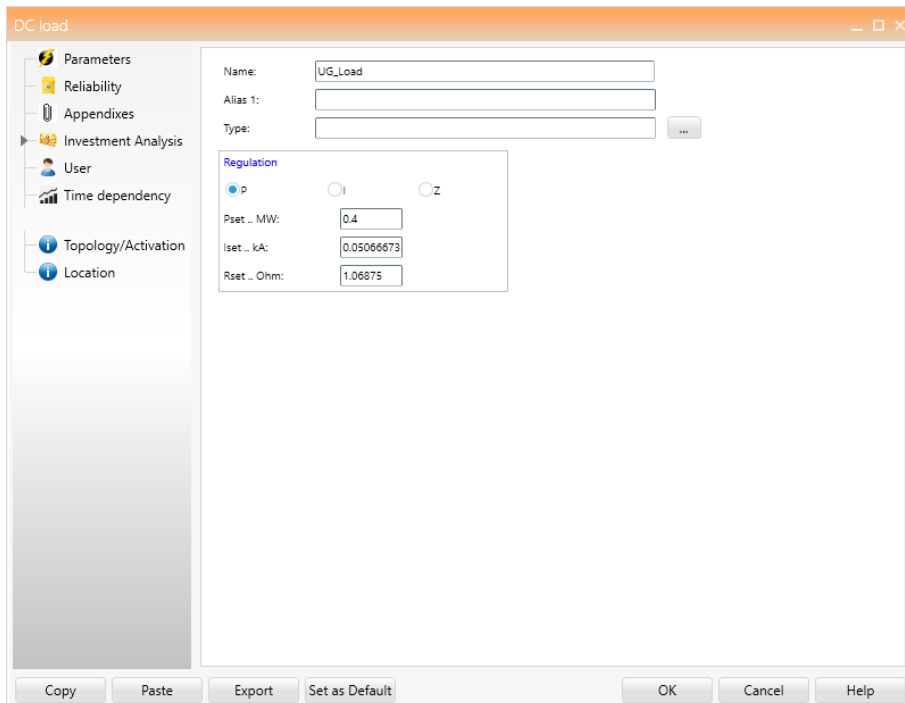


Figura 27. Configurazione dell'elemento DC-Load (punto di carico DC)

2.2.8 Generatori eolici AC

I generatori eolici sono rappresentati mediante l'elemento **AC disperse generator**, definendo la tipologia di produzione (nella scheda *Parameters: Production Type* = Wind e *Wind Plant Type* = On Shore), oltre che la potenza ed il fattore di potenza di targa (tipicamente pari a 0.9) (Figura 28).

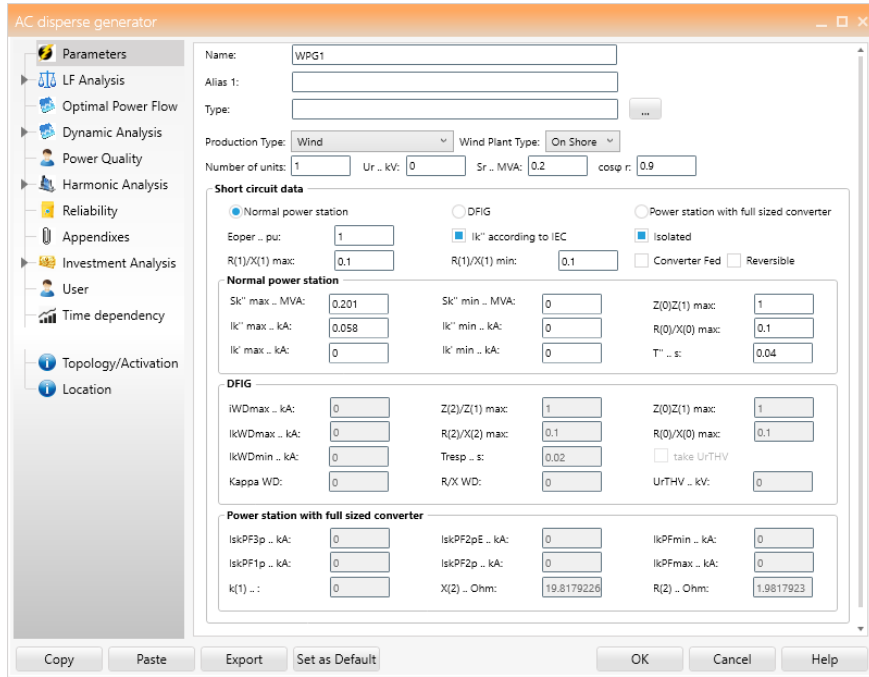


Figura 28. Configurazione dell'elemento AC disperse generator (Generatore eolico) – Parametri di targa

I parametri di esercizio sono poi definiti nella scheda *LF Analysis* (Figura 29), in cui viene indicata la tipologia di controllo (settata su PC, ovvero potenza e fattore di potenza, di cui sono inseriti i valori).

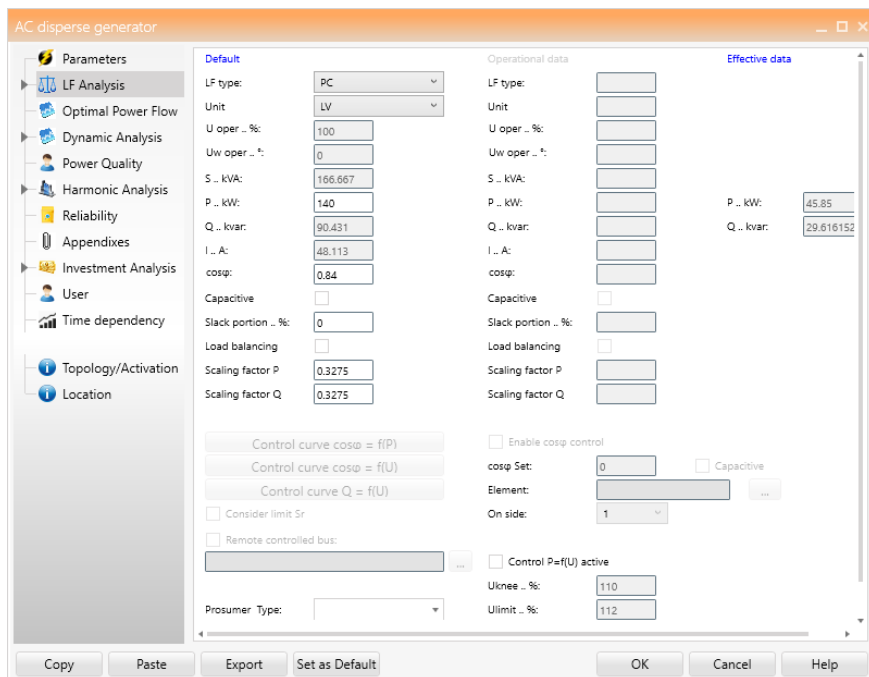


Figura 29. Configurazione dell'elemento AC disperse generator (Generatore eolico AC) – Parametri di esercizio

2.2.9 Generatori eolici e micro-eolici DC

I generatori eolici DC non sono contemplati nativamente nel Neplan: all'interno dei modelli di rete sono stati simulati con l'elemento **DC motor** (Figura 30). In particolare, vengono settati i valori di tensione di targa (U_r) e di corrente di targa (I_r): quest'ultima è ovviamente ricavata come rapporto tra la potenza e la tensione di targa. È stata poi impostata la potenza generata dall'impianto (P_{set}), impostata come valore negativo.

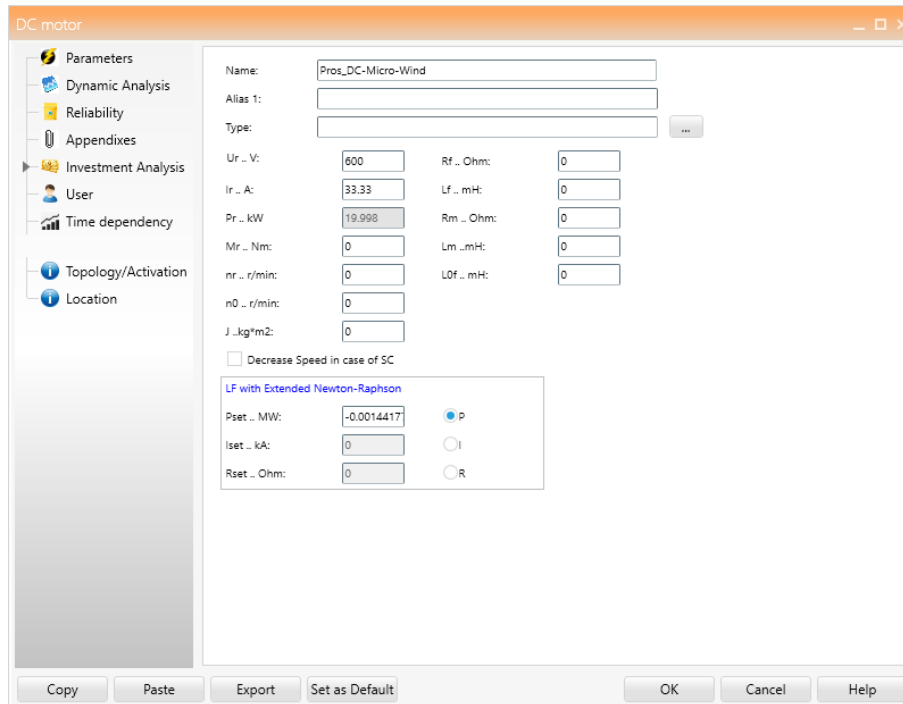


Figura 30. Configurazione dell'elemento DC motor (Generatore eolico DC)

2.2.10 Generatori fotovoltaici

Sebbene il Neplan annoveri tra i suoi elementi di default il generatore fotovoltaico (**DC photovoltaic**), lo stesso è inteso dal software esclusivamente come generatore di tensione, e non è contemplato un controllo della potenza generata. Pertanto, per simulare un sistema di generazione fotovoltaica connessa ad una barra DC (all'interno dei modelli di rete non sono previsti impianti fotovoltaici connessi direttamente a barre AC) sono stati utilizzati, nell'ordine: un PWM connesso alla barra DC; un nodo AC (node); un PWM; una barra DC alla stessa tensione della barra di partenza; l'elemento DC photovoltaic. In sostanza, l'elemento DC photovoltaic è connesso alla barra DC attraverso un convertitore DC-DC (vedi par. 2.2.5) inserito tra due barre DC operanti alla stessa tensione, e che agisce come controllore di potenza. In tale configurazione, il convertitore verrà rappresentato con la sigla CTRL per sottolineare che la sua funzione non è quella di ridurre il livello di tensione, ma di controllare la potenza transitata. Il modello del generatore fotovoltaico è riportato in Figura 31.

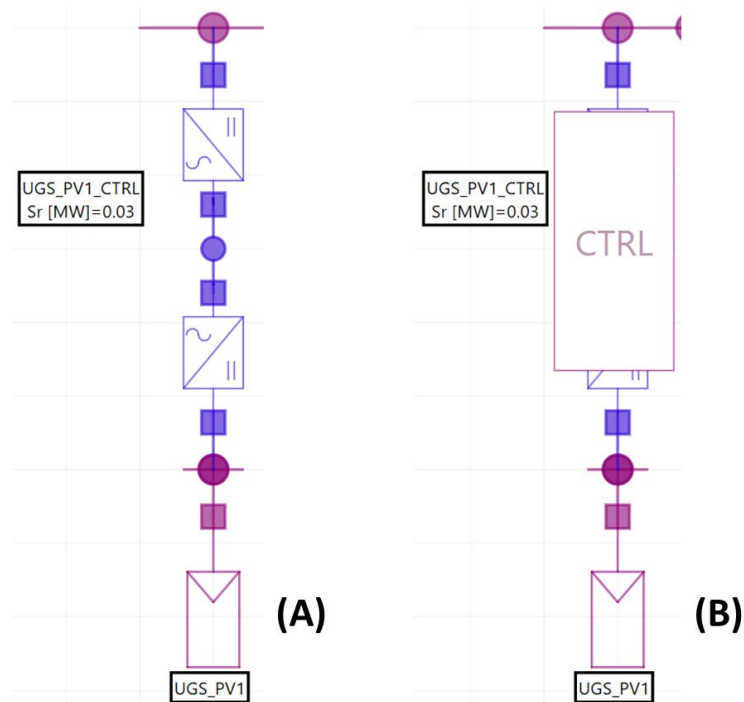


Figura 31. Modello di un impianto di generazione fotovoltaica nel dettaglio (A) e con maschera (B).

Pertanto, come descritto nel paragrafo 2.2.5, il PWM di controllo, che avrà desinenza “_CTRL”, deve operare in $Q-P$, dove a P sarà attribuito il valore di potenza generata dall’impianto fotovoltaico (ricordando che tale valore deve essere negativo). Ad esso possono essere inseriti eventuali fattori di dissipazione, se necessari (supposti assenti nei modelli realizzati). È infine necessario che i DC node a monte e valle del controllore, nonché il DC photovoltaic abbiano il medesimo valore di tensione di targa.

2.2.11 Accumulatore di energia elettrica (BESS)

Analogamente a quanto già visto per i generatori fotovoltaici, i sistemi di accumulo DC sono previsti all’interno del Neplan tramite l’elemento **Battery**, che è inteso dal software esclusivamente come generatore di tensione, e non è contemplato un controllo della potenza generata/assorbita. Pertanto, analogamente a quanto implementato per i generatori fotovoltaici DC, per simulare un sistema di accumulo, l’elemento Battery è connesso alla barra DC attraverso un convertitore DC-DC (vedi par. 2.2.5) inserito tra due barre DC operanti alla stessa tensione, e che agisce come controllore di potenza. In tale configurazione, tale convertitore verrà rappresentato con la sigla CTRL ed avrà la funzione di controllare la potenza transitata. Il modello di accumulatore elettrico a batteria è riportato in Figura 32.

Il PWM di controllo, che avrà desinenza “_CTRL”, deve operare in $Q-P$, dove a P sarà attribuito il valore di potenza assorbita (valore positivo) o erogata (valore negativo) dal sistema di accumulo. Ad esso possono essere inseriti eventuali fattori di dissipazione, se necessari (supposti assenti nei modelli realizzati). Anche in tal caso, è necessario che i DC node a monte e valle del controllore, nonché l’elemento Battery abbiano il medesimo valore di tensione di targa.

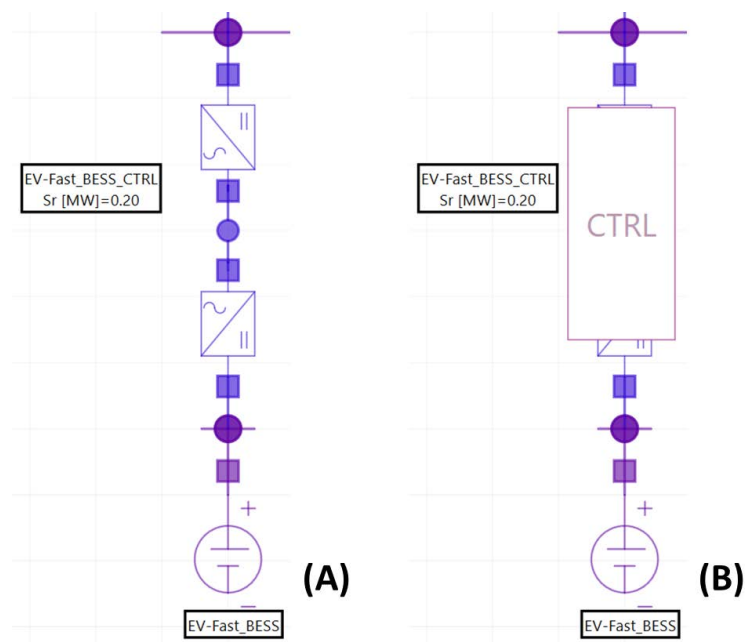


Figura 32. Modello di un sistema di accumulo nel dettaglio (A) e con maschera (B).

3 CONCLUSIONI

Nel presente rapporto tecnico sono state descritte due reti ibride, una riguardante un contesto urbano, l'altra caratteristica di un'area portuale progettate come modello di riferimento per le successive attività di studio del progetto.

In accordo con lo studio effettuato all'interno del report tecnico RdS/PTR2020/001 e le analisi condotte nell'ambito della LA1.4, le due reti presentano sia una significativa penetrazione delle fonti rinnovabili, quali la generazione da fonte fotovoltaica e da fonte eolica, sia la diffusa adozione di unità di stoccaggio energetico mediante sistemi di batterie. Entrambe le reti sono caratterizzate da un alto grado di ibridizzazione: la presenza di porzioni di reti in corrente alternata è largamente diffusa nella quasi totalità dei settori descritti. Infine, nelle reti proposte è possibile individuare porzioni sia in media che in bassa tensione: tali livelli sono presenti nelle porzioni di rete in corrente alternata come in quelle in corrente continua.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] International Maritime Organization - Fourth IMO GHG Study 2020 (Published in 2021) available at: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20Executive-Summary.pdf>
- [2] A. Verdicchio, P. Ladoux, H. Caron, and C. Courtois, "New Medium-Voltage DC Railway Electrification System," *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, vol. 4, no. 2, pp. 591–604, Jun. 2018, DOI: 10.1109/TTE.2018.2826780.
- [3] G. Meyer, R. Bucknall, and D. Breuil, *Electrification of the Transport System* (2017) DOI: 10.2777/443147.
- [4] M. Sechilariu and F. Locment, "Chapter 1 - Connecting and Integrating Variable Renewable Electricity in Utility Grid," M. Sechilariu and F. B. T.-U. D. C. M. Locment, Eds. Butterworth-Heinemann, 2016, pp. 1–33. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803736-2.00001-3>.
- [5] International maritime organization available at: <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>
- [6] Sidun F.; Yu W.; Bin G.; Yan X. Toward Future Green Maritime Transportation: An Overview of Seaport Microgrids and All-Electric Ships. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol: 69 Issue: 1
- [7] Bahrman, M.P.; Johnson, B.K. The ABCs of HVDC Transmission Technologies. *IEEE Power Energy Mag.* 2007, 5, 32–44.
- [8] Molavi, A.; Shi, J.; Wu, Y.; Lim, G.J. Enabling smart ports through the integration of microgrids: A two-stage stochastic programming approach. *Appl. Energy* 2020, 258, 114022.
- [9] Song, T.; Li, Y.; Zhang, X.-P.; Wu, C.; Li, J.; Guo, Y.; Gu, H. Integrated port energy system considering integrated demand response and energy interconnection. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2020, 117, 105654.
- [10] Purta, M.; Marciniak Tomasz, T.; Rozenbaum, K. Report "Developing offshore wind power in Poland" McKinsey & Company: Warszawa, Poland, 2016.
- [11] Bresesti, P.; Kling, W.L.; Hendriks, R.L.; Vailati, R. HVDC Connection of Offshore Wind Farms to the Transmission System. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2007, 22, 37–43.
- [12] <https://www.digsilent.de/en/products.html>.
- [13] <https://www.neplan.ch/>.

ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI

AC	Alternate Current (Corrente alternata)
AT	Alta tensione
BB	BusBar
BESS	Battery Energy Storage System (Sistema di stoccaggio di energia mediante batterie)
BT	Bassa tensione
CHAdEMO	<i>CHARge de MOve (Ricarica per la mobilità)</i>
CHP	Combined Heat and Power (Impianto di cogenerazione)
DC	Direct Current (Corrente Continua)
EHV	Extra High Voltage (Altissima tensione)
EV	Electrical Vehicle (Veicolo elettrico)
HM	Handling Machine (Macchinario di movimentazione merci)
HV	High Voltage (Alta tensione)
LA	Linea di attività
LED	Light Emitting Diode (Diodo ad emissione luminosa)
LV	Low Voltage (Bassa tensione)
MT	Media tensione
MV	Medium Voltage (Media tensione)
OHL	OverHead Line (Linee aeree)
PV	PhotoVoltaic (Impianto fotovoltaico)
PWM	Pulse-Width Modulation
PWR	Power
RS	Road Services (Servizi stradali)
RT	Rapporto tecnico
SSC	Short Circuit Power
TR	Trasformatore
UG	UnderGround
UGS	UnderGround Services
VSC	Voltage Source Converter
WPG	Wind Power Generator (Generatore eolico)
R	Resistenza
V	Tensione
V_n	Tensione nominale
X	Induttanza