

Sicilia – Malta: il nuovo collegamento RTN a 220 kV in corrente alternata

Leandro Cacioli Enrico Maria Carlini Calogero Cassaro Giorgio Maria Giannuzzi Antonio Pascucci *TERNA Rete Italia*
Salvatore Favuzza Mariano Giuseppe Ippolito Antonino Madonia Fabio Massaro Giuseppe Paternò *DEIM, Università degli Studi di Palermo*

Descrizione dettagliata degli aspetti tecnologici e delle prestazioni funzionali di maggiore rilevanza sui cavi utilizzati, sui sistemi e sulle logiche di protezione contro i guasti. Vantaggi, potenzialità e criticità legate all'esercizio.

Introduzione

La realizzazione del collegamento rappresenta l'intervento cardine del riorientamento strategico del sistema energetico maltese. Tale interconnessione presenta caratteristiche inedite dal punto di vista regolatorio, trattandosi di un'interconnessione pubblica "unilaterale", cioè realizzata, posseduta e gestita da uno solo dei gestori di rete confinanti (Enemalta), il che ha reso necessario soluzioni peculiari per i processi autorizzativi e per la gestione della capacità [1].

Il progetto, inserito nel programma infrastrutturale europeo *European Energy Programme for Recovery* (EPR), in quanto opera di pubblica utilità, è stato in parte finanziato dall'Unione Europea, che ha messo a disposizione 100 milioni di euro per la sua realizzazione (circa metà del costo totale dell'opera). Una volta concluso, il collegamento elettrico entrerà a pieno titolo nei cosiddetti *Trans-European Energy Networks* (TEN-E).

Prima del cavo, Malta era un sistema elettrico isolato, unico nell'Unione Europea insieme a Cipro, caratterizzato da alti costi di produzione del-

l'energia (per via di diseconomie di scala e mancanza di fonti a basso costo) e da bassi parametri di affidabilità e robustezza della rete. L'interconnessione con la Sicilia porrà fine all'isolamento della rete elettrica maltese dal resto d'Europa, migliorando l'affidabilità della rete elettrica e incrementando la sicurezza dell'approvvigionamento energetico.

Nel corso degli ultimi anni, a causa della contrazione della domanda di energia elettrica dovuta alla crisi economica e della sempre maggior presenza di produzione di energia elettrica da FRNP (prevalentemente eolica su rete AT e fotovoltaica su rete MT), le centrali termoelettriche siciliane, quasi tutte a ciclo combinato, sono state costrette a lavorare a carico ridotto. L'eccesso di produzione elettrica della Sicilia rispetto al proprio fabbisogno può rappresentare una possibile fonte di approvvigionamento per il sistema elettrico maltese, consentendo di spegnere definitivamente le unità produttive più vecchie e inquinanti.

Pertanto, l'interconnessione con la rete elettrica siciliana, in risposta all'esigenza di Malta di sopprimere all'obsoleto parco di produzione, rappresenta allo stesso tempo un'importante opportunità per aumentare lo sfruttamento del crescente potenziale rinnovabile dell'isola italiana [2].

Grazie alle importazioni di energia elettrica dalla Sicilia, Malta avrà la possibilità di ridurre il costo del kWh diminuendo la propria generazione elettrica. La riduzione delle ore di produzione delle centrali elettriche maltesi determinerà il rispetto dei limiti di emissione sia di CO₂ che di altre sostanze inquinanti, ma soprattutto il riallineamento con gli obblighi europei del cosiddetto 20-20-20.

Caratteristiche del sistema elettrico siciliano

La Sicilia è attualmente interconnessa con il Continente attraverso un unico collegamento a 380 kV in corrente alternata e dispone di un sistema di trasmissione primario costituito essenzialmente da alcuni collegamenti a 380 kV, quali "Chiaromonte Gulfi – Priolo – Isab – ERG NuCe N.", "Paternò – Chiaromonte Gulfi" e "Paternò – Sorgente", oltre che da un anello a 220 kV con ridotte potenzialità in termini di capacità di trasporto tra l'area orientale e occidentale.

Data la dimensione limitata del sistema di trasmissione primario a 380 kV, la rete elettrica Siciliana è composta quasi esclusivamente da linee a 220 e 150 kV.

Con una sola interconnessione con il Continente, la sicurezza del sistema elettrico siciliano viene mantenuta gestendo di norma l'isola in esportazione. Alcune criticità saranno risolte con l'entrata in servizio del raddoppio del collegamento Sorgente-Rizziconi che diventerà operativa nel 2016.

Il parco produttivo termoelettrico siciliano, con una potenza installata complessiva di circa 5.434 MW, è concentrato essenzialmente su tre poli: Termini Imerese, Milazzo e Priolo Gargallo, quest'ultimo identificato come polo limitato di produzione di energia elettrica. Oltre al sistema produttivo tradizionale, la Sicilia presenta un'elevata percentuale di energia elettrica prodotta da impianti eolici e fotovoltaici, con una forte presenza di generazione distribuita sul territorio. Attualmente la Sicilia, a fronte di un fabbisogno orario medio di potenza di 2.103 MW [3], presenta:

- una potenza eolica installata di 1.677 MW in AT e di 85 MW in MT;
- una capacità fotovoltaica installata di 1.129 MW in MT e di 75 MW in AT.

Caratteristiche del sistema elettrico maltese

Prima di realizzare il nuovo collegamento con il sistema elettrico siciliano, il sistema elettrico maltese era isolato. L'interconnessione con la Sicilia rappresenta l'unico collegamento con la rete elettrica europea e sarà in grado di rendere più affidabile e stabile l'esercizio del sistema maltese.

L'azienda di Stato maltese, Enemalta, oltre a gestire la rete elettrica maltese, gestisce due centrali di produzione, sufficienti a garantire la fornitura di energia elettrica delle isole di Malta e di Gozo.

Le due centrali hanno complessivamente una potenza installata di 614 MW, ripartita in:

- 165 MW nella Centrale di produzione di Marsa, caratterizzata da unità a vapore, alimentate con

olio combustibile btz, e una turbina a gas alimentata con olio combustibile distillato;

- 449 MW nella Centrale di produzione di Delimara, caratterizzata da unità a vapore, alimentate con olio combustibile btz, da turbine a gas e da gruppi di produzione a ciclo combinato, alimentate con olio combustibile distillato, oltre a diversi gruppi diesel.

Considerato che Malta non ha risorse di energia primaria, il parco di produzione termoelettrico è interamente dipendente dai combustibili importati, quali olio combustibile pesante e soprattutto distillati leggeri, con ripercussioni economiche non indifferenti sul prezzo locale dell'energia elettrica.

L'interconnessione elettrica con la Sicilia, oltre a migliorare la stabilità e l'efficienza del sistema elettrico maltese, determinerà la riduzione delle ore di produzione di alcuni gruppi di produzione alimentati ad olio combustibile, con benefici non solo ambientali, in termini di riduzione delle emissioni di CO₂, ma anche economici, beneficiando di energia a basso costo proveniente dalla Sicilia.

Data la capacità produttiva delle due centrali elettriche (614 MW), la fornitura di energia elettrica delle isole maltesi (Malta e Gozo) è ampiamente garantita, dal momento che il fabbisogno massimo di potenza attiva che caratterizza il sistema maltese è pari a circa 434 MW.

Specifiche tecniche del nuovo collegamento di interconnessione

L'interconnessione elettrica Sicilia-Malta è costituita dal collegamento in cavo sottomarino in corrente alternata (HVAC) più lungo al mondo[4]. Si tratta di una linea in cavo a 220 kV in c.a. realizzata prevalentemente in cavo sottomarino.

Le stazioni di estremità, entrambe a 220 kV, sono SE Ragusa (Stazione Elettrica Ragusa), ubicata in Sicilia di proprietà di Terna e SE Maghtab (Stazione Elettrica Maghtab), ubicata a Malta di proprietà di Enemalta.

Nella SE Ragusa (più specificatamente nella sezione a 220 kV) è stato predisposto un montante di linea completo di sistema di protezione, misura e sezionamento, dedicato all'interconnessione con Malta. Inoltre, in prossimità di tale montante, è stata realizzata la SSE Ragusa (Sottostazione Elettrica Ragusa) a 220 kV, isolata in aria, di proprietà di Enemalta. Questa sottostazione, oltre ai sistemi di protezione, misura e sezionamento del cavo AT, descritti in maggiore dettaglio nel prossimo paragrafo, è dotata di un reattore trifase di compensazione da 240 MVar (a 245 kV) collegato rigidamente al cavo AT. Inoltre, è presente un secondo reattore shunt

della stessa potenza, approvvigionato per il secondo futuro cavo di interconnessione, attualmente utilizzato come riserva.

La SE Maghtab è costituita da due sezioni, una a 135 kV ed una a 220 kV, realizzate in esecuzione blindata SF6; sulla sezione a 220 kV è stato predisposto un montante di linea completo di sistema di protezione, misura e sezionamento.

Analogamente alla SSE Ragusa, nella SE Maghtab sono stati previsti due reattori trifase di compensazione a reattanza variabile da 60 a 120 MVAR (alla tensione di 245 kV), così suddivisi:

- un reattore trifase di compensazione collegato rigidamente al cavo AT tramite sezionatore e dotato di commutatore sottocarico (CSC);
- un reattore trifase di compensazione collegato direttamente alle sbarre a 220 kV della SE Maghtab con commutatore sottocarico (CSC) che, diversamente dal caso della SSE Ragusa, può essere inserito o disinserto in quanto dotato di interruttore.

La sezione a 220 kV e quella a 135 kV della SE Maghtab sono entrambe in doppia sbarra e collegate tra loro da due ATR 220 kV/135 kV, ciascuno con una potenza nominale di 250 MVA.

Le principali specifiche dei reattori shunt sono riportati nella **tabella 1**.

Il collegamento in cavo a 220 kV tra la SSE Ragusa (Sicilia) e la SE Maghtab (Malta), che può trasmettere la potenza massima di 200 MW, è articolato in:

- un tratto in cavo terrestre di circa 19,1 km (**figura 1**), costituito da una terna di cavi unipolari, alla tensione nominale di 220 kV in c.a., con un'anima di alluminio di sezione pari a 1000 mm² e isolamento realizzato in XLPE;

- un tratto in cavo sottomarino di circa 98,8 + 0,85 km (**figura 2**), costituito da un cavo tripolare, alla tensione nominale di 220 kV in c.a., con un'anima di rame di sezione pari a 630 mm² e isolamento realizzato in XLPE.

Tabella 1 Dati caratteristici dei reattori shunt

	Rating	IT: 240 MVAR MT: 120 MVAR + 120 MVAR (switched)
1	Rating	
2	Tappings	IT: Fixed MT: On Load Tap Changer (CSC)
3	Cooling	ONAN
4	Phasor group	YN
5	Number of limbs	5

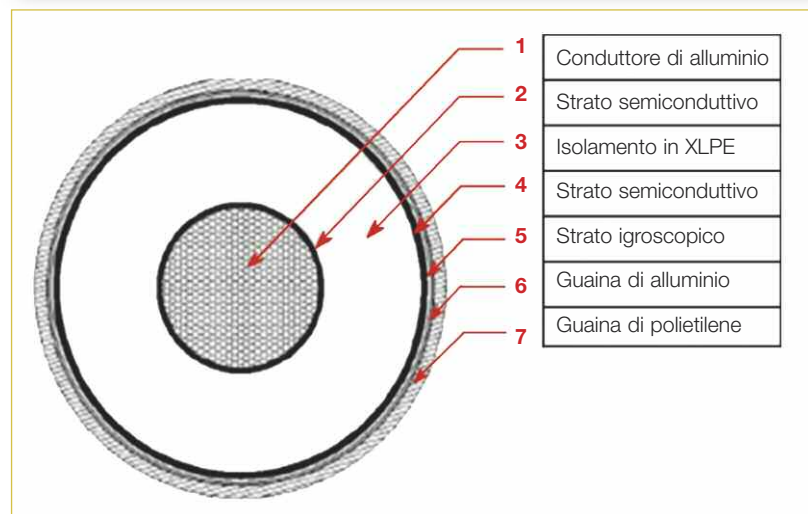


Figura 1 Sezione del cavo utilizzato per il collegamento terrestre.

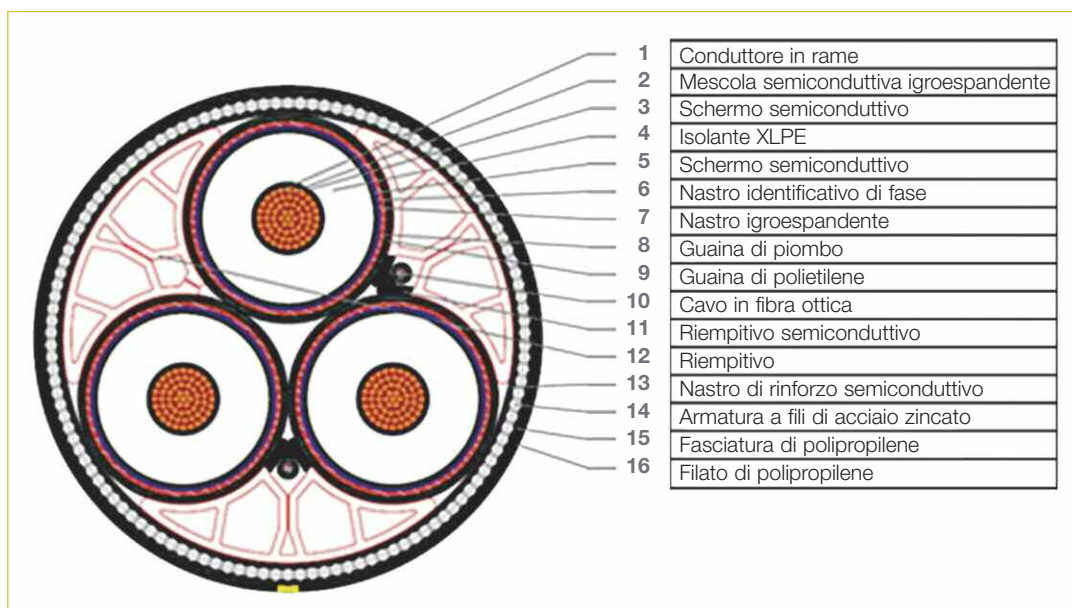


Figura 2 Sezione del cavo utilizzato per il collegamento sottomarino.

Tabella 2 Dati di specifica del cavo terrestre (19,1 km)

Conduttore	1.000 mm ² , Al
Isolamento	XLPE, 19,1 mm
Water-blocking tape	Semiconducting water-swellable tape
Guaina Metallica	Aluminium, 1,2 mm, 50 kA for 0,5 s
Guaina di Plastica	HDPE, 4 mm
Corrente nominale	763 A
Capacità di sovraccarico 1 h	1.144,5 A (150%)
Massima tensione di esercizio	245 kV
Basic impulse insulation level (BIL)	1.050 kV
Resistenza in c.c. del conduttore	0,0291 Ω/km
Resistenza in c.a. del conduttore	0,0405 Ω/km
Induttanza di fase	0,382 mH/km
Capacità di fase	0,204 F/km
Resistenza alla sequenza positiva	0,04053 Ω/km
Reattanza sequenza positiva	0,119 Ω/km
Diametro esterno	100,8 mm

Tabella 3 Dati di specifica del cavo sottomarino (98,8 + 0,85 km)

Conduttore	630 mm ² , Cu
Isolamento	XLPE, 24 mm
Water-blocking tape	Semiconducting water-swellable tape
Guaina Metallica	Lead alloy ½C, 3 mm, 29 kA for 1 s
Guaina di Plastica	Semiconducting PE, 2,6 mm
Armatura di acciaio	1 layer, 120 GSWA wires x 5,6 mm Ø
Corrente nominale	655 A (249 MVA)
Capacità di sovraccarico 1 h	1.113 A (170%)
Massima tensione di esercizio	245 kV
Basic impulse insulation level (BIL)	1.050 kV
Resistenza in c.c. del conduttore	0,0283 Ω/km
Resistenza in c.a. del conduttore	0,0390 Ω/km
Induttanza di fase	0,42 mH/km
Capacità di fase	0,156 F/km
Resistenza alla sequenza positiva	0,068 Ω/km
Reattanza sequenza positiva	0,13 Ω/km
Diametro esterno	239 mm

La lunghezza totale del collegamento è di 118,75 km.

Per problemi legati alla regolazione della tensione, l'energizzazione del collegamento AT è possibile solo con lancio di tensione dalla SSE Ragusa verso la SE Maghtab, evitando così che il consumo reattivo del cavo, non completamente compensato dai reattori shunt, gravi sulla rete maltese [5].

Le caratteristiche principali del cavo terrestre sono riportate nella **tabella 2**.

Le caratteristiche principali del cavo sottomarino sono riportate nella **tabella 3**.

Sistema di protezione del cavo a 220 kV c.a.

Protezione del collegamento in cavo AT

Terna (Unità Analisi di Esercizio del Dispacciamento di Palermo e Centro di Eccellenza Protezioni), ha progettato con Enemalta il sistema di protezione di seguito descritto. Come riportato nella **figura 3**, il nuovo collegamento a 220 kV è dotato, in ciascuna stazione (SE Ragusa-SSE Ragusa- SE Maghtab), di un sistema di monitoraggio, controllo e protezione completamente ridondante, al fine di garantire adeguati margini di sicurezza per l'esercizio delle due reti elettriche interconnesse. Considerata l'importanza del nuovo collegamento e delle relative stazioni terminali, il sistema di protezione è in grado di rilevare le diverse tipologie di guasto che possono presentarsi sia sul cavo di collegamento che in prossimità delle stazioni elettriche. Più nel dettaglio, ciascuno dei diversi tipi di guasto che possono interessare il sistema di interconnessione deve essere rilevato da almeno due protezioni, basate su principi di funzionamento diversi. Un guasto sul cavo a 220 kV, o sui reattori di compensazione connessi all'estremità del cavo, deve essere eliminato in tempo base tramite l'apertura degli interruttori di linea posti all'estremità del cavo AT (presso SSE Ragusa e SE Maghtab).

Questo obiettivo ha comportato un'architettura del sistema completamente duplicata, costituita da due sistemi di protezione comprendenti:

- una protezione differenziale di linea (87 L) con integrata la funzione di protezione distanziometrica (21.2);
- una protezione distanziometrica di linea (21.1) con schema di telepilotaggio associato.

Per garantire la priorità di intervento di uno dei due sistemi di protezione, trasferendo automaticamente (senza ritardo) il segnale di comando all'altro in caso di guasto, entrambe le protezioni utilizzano il collegamento in *Fibra Ottica* (FO), po-

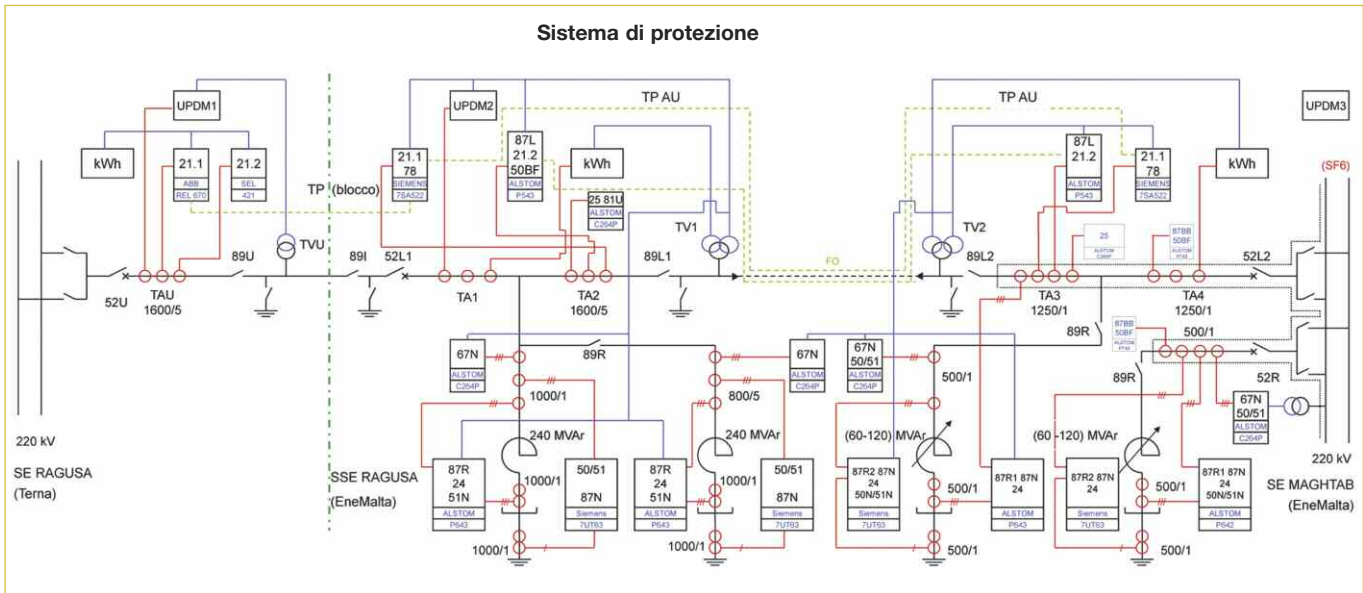


Figura 3 Schema unifilare del Collegamento a 220 kV Sicilia – Malta.

sato insieme al cavo sottomarino; tale collegamento è utilizzato dalla prima protezione per trasmettere da un'estremità all'altra i segnali di corrente misurati nei due terminali, mentre dalla seconda per l'invio del segnale logico usato per il sistema di telepilotaggio.

Come già indicato, alla protezione differenziale di linea è integrata anche la funzione protettiva distanziometrica, in cui il primo gradino è normalmente inattivo ed è pronto ad intervenire in tempo base in caso di anomalia della protezione differenziale di linea, principalmente per perdita della comunicazione in FO. Le zone successive alla prima, di entrambe le protezioni distanziometriche, hanno la funzione di riserva per guasti esterni alla linea in cavo.

Protezione del tratto aereo tra la SE Ragusa e la SSE Ragusa

Oltre ai sistemi di protezione prima descritti, è previsto un ulteriore sistema per la protezione del breve collegamento aereo tra la SE Ragusa, di proprietà di Terna, e la SSE Ragusa di proprietà di EneMalta. Più in particolare, nella stazione SE Ragusa (Terna), il montante di linea dedicato al collegamento Sicilia-Malta è equipaggiato con due protezioni distanziometriche (21.1 e 21.2) che comandano l'apertura dell'interruttore d'utente (52 U) situato nella stessa stazione (figura 3).

Tale sistema di protezione, oltre a proteggere il breve tratto di linea fino alla SSE Ragusa, può essere di rincalzo alle protezioni principali di linea della SSE Ragusa descritte precedentemente.

Il primo gradino di entrambe le protezioni distanziometriche, opportunamente ritardato, è

asservito ad uno schema di blocco attivato da uno dei seguenti segnali:

- intervento della protezione differenziale di linea (87 L);
- avviamento in direzione avanti di una delle due protezioni distanziometriche della SSE Ragusa;
- avviamento delle protezioni del reattore shunt della SSE Ragusa.

Il gradino successivo, invece, regolato secondo criteri di selettività, ha la funzione di riserva in caso di guasti esterni al tratto aereo protetto.

Per garantire il corretto esercizio del cavo di collegamento a 220 kV, le richiuse rapide e lente automatiche localizzate nella SE Ragusa, SSE Ragusa e SE Maghtab devono essere escluse. Inoltre, la chiusura degli interruttori di linea (52 L) è asservita ad un dispositivo di parallelo che controlla i parametri differenza di tensione ($\Delta V\%$), scorrimento (s) e differenza d'angolo ($\Delta\Phi$) [5].

Studi di sistema

Terna (Unità Analisi di Esercizio del Centro Nazionale di Controllo e del Dispacciamento di Palermo) ha condotto, per la connessione del sistema maltese, un'analisi approfondita mediante simulazioni in statica e dinamica [8] tramite il software Digilent®. In particolare gli studi sono stati utilizzati per:

- progettare e tarare il sistema di protezione;
- verificare l'interazione tra le regolazioni (frequenza, tensione) del sistema di Malta e quello siciliano;
- definire le prestazioni richieste dall'interconnessione;

- valutare la stabilità transitoria ed alle piccole oscillazioni durante l'esercizio normale e a seguito di contingenze critiche;
- verificare l'efficacia dei sistemi di difesa (teleseccati, alleggerimento di carico) delle due reti ed apportare gli opportuni aggiornamenti;
- verificare l'applicazione ed impatto del criterio N-1 sulle due reti interconnesse ed identificare le contingenze critiche;
- valutare la gestione del reattivo tenendo conto del sistema di compensazione adottato per il cavo ed eventuali contingenze critiche.

Dalle analisi condotte, che costituiscono uno studio di design di sistema applicato alla rete maltese estremamente completo e realizzato interamente grazie al know how di Terna, sono state dedotte prescrizioni tecniche riportate nel Regolamento di Esercizio che disciplina la gestione del collegamento Italia-Malta ed interventi di adeguamento condotti sul sistema maltese, sia sui sistemi di regolazione delle unità di produzione che sui dispositivi *power system stabilizer* oltre che ad un aggiornamento del Piano di Alleggerimento (figura 4).

Vantaggi e criticità per l'esercizio del collegamento a 220 kV c.a.

Vantaggi attesi

Al fine di valutare i vantaggi che il nuovo collegamento a 220 kV avrebbe potuto apportare al sistema elettrico siciliano, è stato condotto uno studio sulle potenzialità degli impianti alimentati da FRNP in Sicilia. In particolare, si evidenzierà come la produzione di energia da fonte eolica potrà partecipare al soddisfacimento del fabbisogno energetico delle isole maltesi, migliorando nel complesso l'esercizio del sistema elettrico siciliano.

Come riportato precedentemente, la Sicilia registra una rilevante presenza di impianti eolici distribuiti sull'intero territorio che, in determinate condizioni meteorologiche, sono in grado di soddisfare una parte considerevole del fabbisogno energetico siciliano. Quando il sistema elettrico siciliano si trova in regime di isola di frequenza, se la produzione eolica è tale da non assicurare sufficienti margini di riserva alla produzione tradizio-

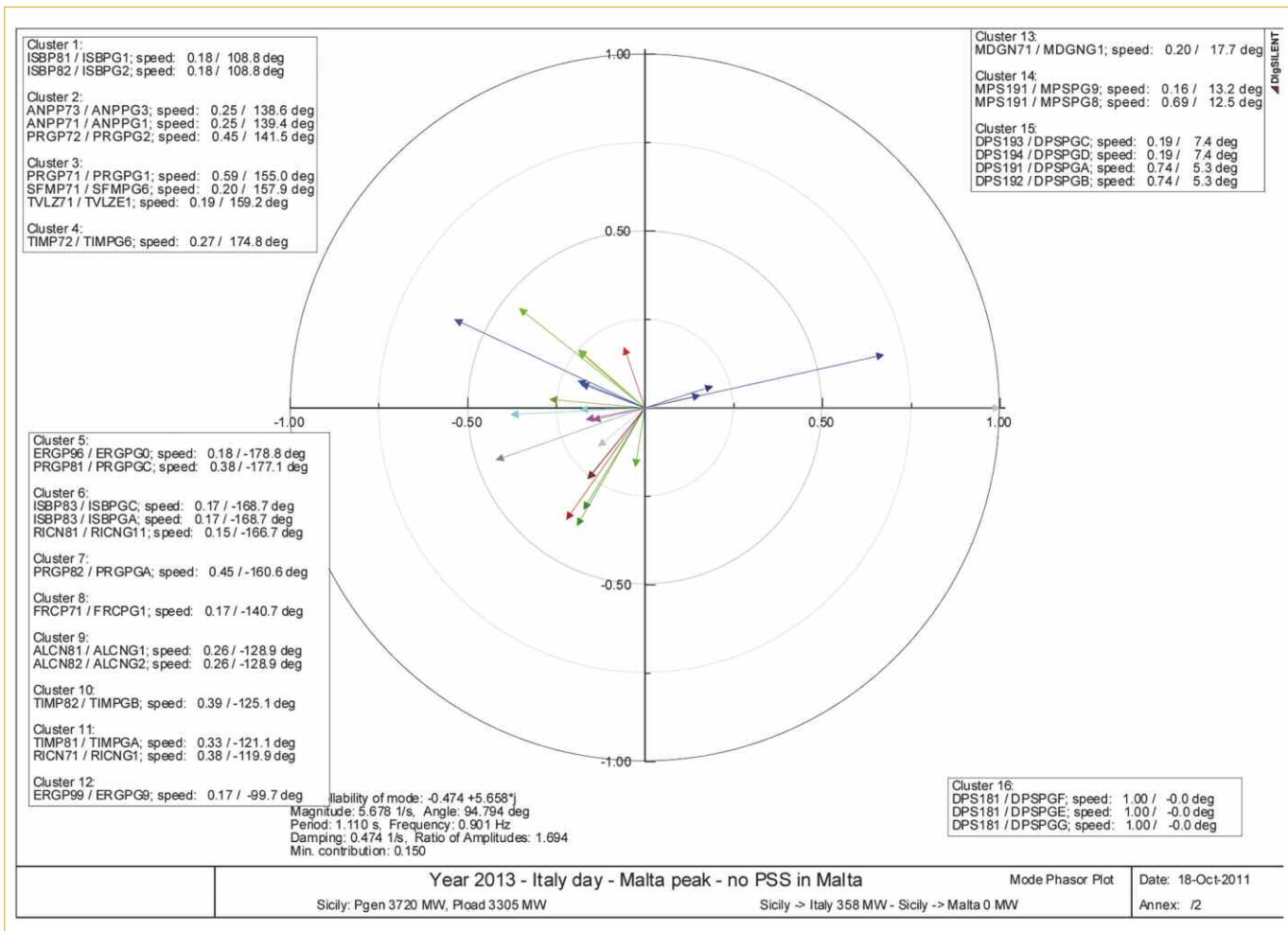


Figura 4 Esempio di analisi agli autovalori per le piccole oscillazioni Sicilia-Malta.

nale e/o la produzione eolica, non adeguata ai buchi di tensione, supera il valore di 315 MW occorre necessariamente modularne la potenza generata al fine garantire adeguati livelli di sicurezza nell'esercizio della rete.

La presenza del nuovo collegamento a 220 kV Sicilia – Malta potrà consentire un maggiore sfruttamento della potenza immessa in rete dagli impianti eolici siciliani, che potrà in parte essere veicolata verso l'isola di carico maltese, evitando, in assetto di funzionamento in rete isolata, il ricorso alla modulazione della produzione eolica immessa sulla rete AT.

Studi in simulazione

Nel seguito vengono riportate alcune analisi, che il Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e modelli Matematici (DEIM) dell'Università degli Studi di Palermo ha condotto in ambiente Neplan®, volte a valutare la dispacciabilità della potenza eolica in presenza del nuovo collegamento ed in assenza del collegamento "Sorgente-Rizziconi". Tale assetto, a partire dal 2016, non sarà più attuato (se non in particolari condizioni), poiché entrerà in servizio un deciso potenziamento della interconnessione tra Sicilia e Continente, realizzato tramite due cavi aggiuntivi a 400 kV; lo scopo delle simulazioni condotte nel seguito quindi è quello di condurre una analisi della correlazione tra rinnovabile ed interconnessione tra due sistemi elettrici isolati.

Gli scenari definiti (**tabella 4**) prefigurano una produzione eolica crescente, a fronte di un fabbisogno costante pari a 2.400 MW.

Essendo lo studio condotto considerando il sistema elettrico siciliano gestito in isola di frequenza, negli scenari proposti sono presenti i gruppi di pompaggio e di produzione. Inoltre, è importante sottolineare che la produzione fotovoltaica presente sulle reti MT/BT, ipotizzata costante e pari a 400 MW, è stata sistematicamente decurtata dal fabbisogno totale. Pertanto la produzione termoelettrica unita alla produzione eolica deve essere in grado di coprire il "carico residuo" inteso come fabbisogno sulla rete AT.

Gli scenari analizzati prevedono un incremento della produzione eolica in parte localizzata sulla dorsale a 220 kV, tra la stazione di Partanna e Chiaromonte Gulfi, dove attualmente sono presenti tre impianti eolici, con una potenza installata di circa 110 MW.

È stato dapprima analizzato un caso base, in assenza del collegamento Sicilia-Malta, per poi passare all'analisi di successivi scenari in presenza dello stesso, al fine di valutare inoltre il futuro incremento della potenza eolica installata afferente, in prospettiva, alla suindicata dorsale a 220 kV.

L'analisi è stata svolta in due fasi successive: dapprima è stato eseguito il calcolo del *load flow* per i diversi scenari ipotizzati, al fine di evidenziare la diversa ripartizione dei flussi di potenza; successivamente è stata implementata una tecnica di traccia-

Tabella 4 Dati utilizzati nei tre scenari simulati

SISTEMA ELETTRICO SICILIANO IN REGIME DI ISOLA DI FREQUENZA	CASO BASE	CASO EOLICO 1	CASO EOLICO 2
	P [MW]	P [MW]	P [MW]
Fabbisogno Totale	2.400	2.400	2.400
Fabbisogno rete AT	2.000	2.000	2.000
Fabbisogno rete AT + Pompaggio	2.145	2.290	2.290
Pompaggio (Anapo)	145	290	290
Termoelettrico	-1.865 ¹	-1.755 ¹	-1.555 ¹
Idrico (Anapo)	-80 ¹	-80 ¹	-80 ¹
Eolico rete AT	-200 ¹	-600 ¹	-800 ¹
Fotovoltaico rete MT/bt	-400 ¹	-400 ¹	-400 ¹
Transito Sorgente - Rizziconi	0	0	0
Transito Sicilia - Malta	0	145	145

¹ Il segno meno contraddistingue la potenza prodotta

mento su tali flussi, con lo scopo ultimo di valutare quantitativamente il contributo da parte degli impianti eolici, oggetto del presente studio, al transito di potenza sul collegamento Sicilia-Malta.

La tecnica di tracciamento dei flussi di potenza [6] consente di quantificare la quota parte di potenza che interessa ogni singolo elemento del sistema, linee e/o carichi, riconducibile ad ogni singolo generatore, tradizionale e non, connesso alla

rete. L'implementazione numerica di tale tecnica è stata effettuata mediante l'utilizzo combinato dei software Matlab® e Neplan® [7].

Simulazione "caso base"

Inizialmente è stato simulato il caso di sistema elettrico siciliano in assetto di isola di frequenza, con il collegamento Sicilia-Malta aperto. L'analisi ha avuto lo scopo precipuo di valutare la ripartizione dei flussi di potenza nella rete in tali condizioni di funzionamento.

È stato ipotizzato un livello di produzione del parco eolico siciliano di tipo medio-basso pari a 200 MW (tabella 5).

Per il caso simulato come caso base, la figura 5 evidenzia in particolare i transiti di potenza sulla dorsale a 220 kV, su cui insistono alcuni impianti eolici.

Simulazione scenario "eolico 1"

Diversamente dal caso base, questa simulazione è stata effettuata prevedendo la presenza del collegamento Sicilia-Malta e incrementando la produzione eolica fino a 600 MW.

In questa simulazione è stato ipotizzato che gli impianti eolici sulla dorsale Partanna - Favara siano in grado di fornire 86 MW di potenza, circa l'80% della potenza installata, al fine di valutare come l'energia eolica prodotta sia veicolata principalmente verso il collegamento Sicilia-Malta (tabella 6).

In questo caso la produzione eolica sulla dorsale Partanna Favara contribuisce alla fornitura di potenza per le isole maltesi, infatti si può notare nella figura 6 che i transiti di potenza sulla dor-

Tabella 5 Dati scenario "caso base"

CASO BASE	P [MW]
Fabbisogno Totale	2.400
Fabbisogno rete AT	2.000
Fabbisogno rete AT + Pompaggio	2.145
Pompaggio (Anapo)	145
Termoelettrico	-1.865 ¹
Idrico (Anapo)	-80 ¹
Eolico rete AT	-200 ¹ { Sambuca - C. Eracle: -15 Rete AT: -185
Fotovoltaico rete MT/bt	-400 ¹
Transito Sorgente - Rizziconi	0
Transito Sicilia - Malta	0

¹ Il segno meno contraddistingue la potenza prodotta

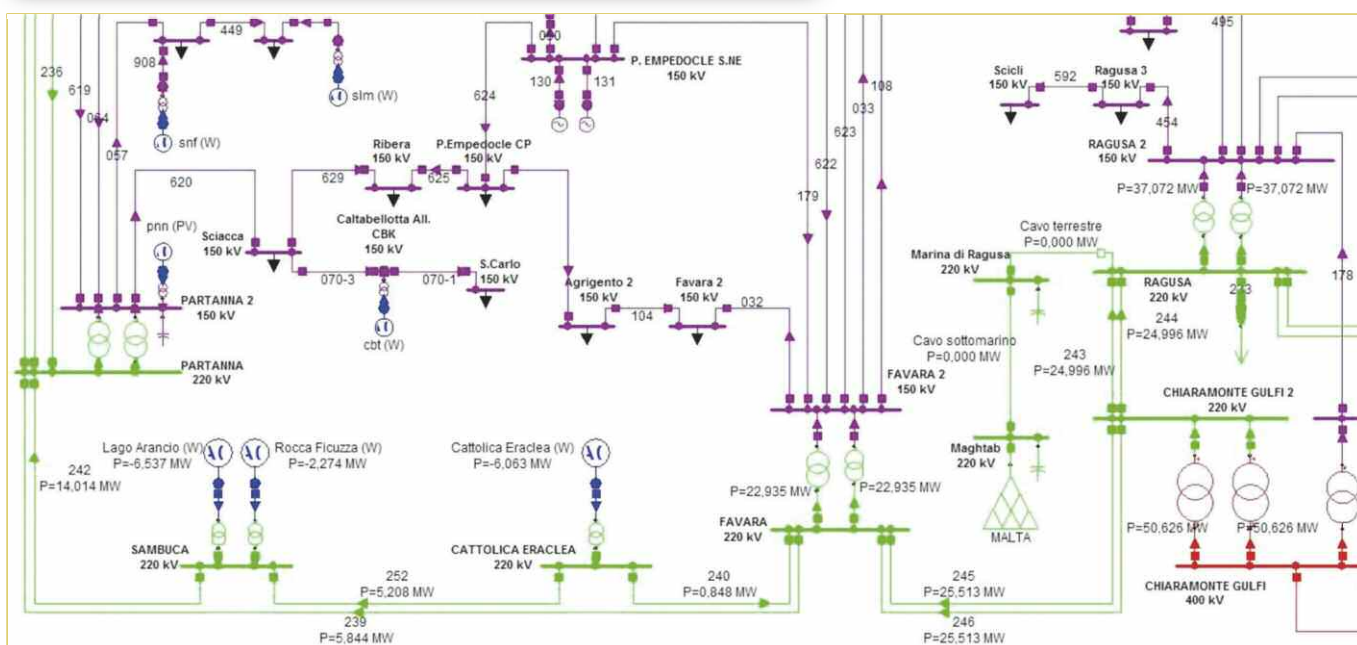


Figura 5 Simulazione caso base – Transiti di potenza nella dorsale a 220 kV Partanna Chiaramonte Gulfi.

sale a 220 kV subiscono un'inversione rispetto allo scenario precedente.

Un ulteriore studio basato sulla sopracitata tecnica di tracciamento dei flussi di potenza consente di dimostrare che gli impianti eolici sulla dorsale Partanna – Favara contribuiscono alla fornitura di potenza per 23,39 MW, circa il 18,89% del totale transito (145 MW) che impegna il collegamento a 220 kV.

Simulazione scenario "eolico 2"

Questa simulazione è stata condotta al fine di valutare gli effetti di un possibile futuro incremento della potenza eolica installata sulla dorsale a 220 kV in prossimità del collegamento con Malta. In questo scenario, ai fini della simulazione, è stato ipotizzato un incremento della potenza degli impianti eolici presenti sulla dorsale 220 kV Partanna-Favara fino a raggiungere 161 MW, circa il 150% della attuale potenza installata.

Sulla base di un incremento complessivo della produzione eolica di 800 MW (tabella 7), è stata effettuata questa simulazione al fine di consolidare l'ipotesi della maggiore dispacciabilità della potenza eolica in presenza del nuovo collegamento.

Dall'analisi dei flussi di potenza, è significativo constatare come la produzione eolica sia in grado di fornire un importante contributo di potenza verso il collegamento a 220 kV Sicilia-Malta (figura 7).

L'implementazione dell'algoritmo di tracciamento ha permesso inoltre di quantificare il contributo di potenza da parte degli impianti eolici studiati al transito sull'interconnessione Sicilia-Malta: tale valore ri-

sulta pari a 51,31 MW, circa il 35,42% dei totali 145 MW che impegnano il collegamento a 220 kV.

Potenziati criticità derivanti dal nuovo collegamento Sicilia-Malta

Se da un lato il nuovo collegamento a 220 kV Sicilia – Malta migliora la dispacciabilità delle FRNP, anche in base a quanto riportato nei paragrafi precedenti, dall'altro potrà determinare particolari con-

Tabella 6 Dati scenario "eolico 1"

CASO EOLICO 1	P [MW]
Fabbisogno Totale	2.400
Fabbisogno rete AT	2.000
Fabbisogno rete AT + Pompaggio	2.290
Pompaggio (Anapo)	290
Termoelettrico	-1.755 ¹
Iidrico (Anapo)	-80 ¹
Eolico rete AT	-600 ¹ { Sambuca - C. Eracle: -86 Rete AT: -514
Fotovoltaico rete MT/bt	-400 ¹
Transito Sorgente – Rizziconi	0
Transito Sicilia – Malta	145

¹ Il segno meno contraddistingue la potenza prodotta

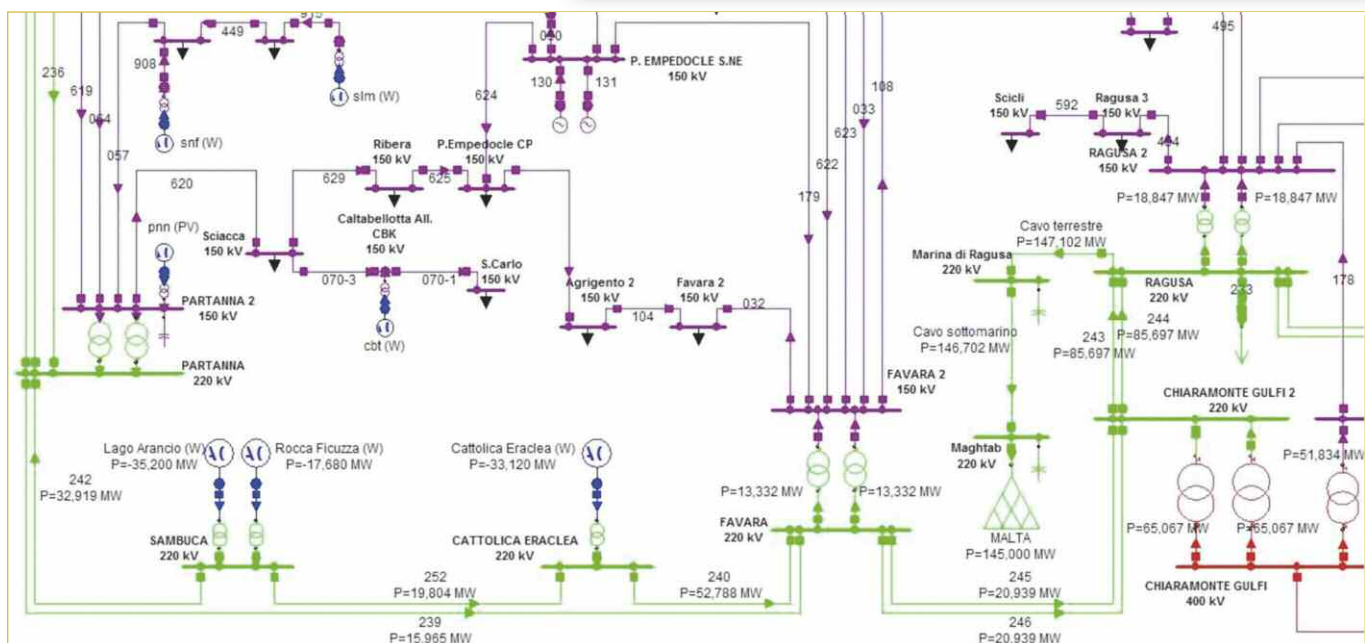


Figura 6 Simulazione scenario "eolico 1" - Transiti di potenza nella dorsale a 220 kV Partanna Chiaramonte Gulfi.

rete di trasmissione

dizioni di esercizio, potenzialmente critiche per il sistema elettrico siciliano e maltese. Il sistema siciliano beneficia di una frequenza stabile, che caratterizza il funzionamento della rete interconnessa europea, solo quando il collegamento con il Continente è in servizio. In assetto di rete isolata, invece, criticità legate ai transitori di frequenza potrebbero presentarsi ancor più frequentemente e

severamente, in quanto sia l'inerzia che l'energia regolante primaria della rete elettrica siciliana e maltese risultano essere di gran lunga inferiori rispetto a quelle della rete continentale europea. Il nuovo collegamento, infatti, a fronte di un incremento di energia regolante poco significativo, realizza un unico sistema (approssimativamente isocrono) che sarà sensibile alle perturbazioni che possono presentarsi in ciascuno dei due sottosistemi interconnessi. Per questo motivo le procedure che regolano la gestione dell'interconnessione prevedono alcune misure di emergenza e limitazioni volte a contenere gli effetti delle criticità suddette.

Inoltre, come è già stato evidenziato, il collegamento a 220 kV Sicilia – Malta è stato realizzato al fine di esportare una quota parte di potenza (sino a 200 MW quando la linea Sorgente – Rizziconi è in servizio e sino a 145 MW in assenza di tale collegamento) utile al soddisfacimento del carico maltese. Pertanto la Sicilia, in assetto di rete isolata, dovrà produrre una maggiore quantità di potenza rispetto al proprio fabbisogno per garantire un adeguato *export* verso Malta. D'altra parte, il parco termoelettrico maltese dovrà garantire la restante copertura del fabbisogno di potenza in base alle necessità del carico locale. Sulla base di questi asset produttivi, l'apertura per guasto del collegamento a 220 kV Sicilia – Malta prefigura una perturbazione critica, soprattutto per il sistema maltese, con un transitorio di sottofrequenza che potrebbe compromettere la stabilità del sistema elettrico stesso e l'intervento del piano di alleggerimento del carico. Il sistema elettrico siciliano sa-

Tabella 7 Dati scenario "eolico 2"

CASO EOLICO 2	P [MW]
Fabbisogno Totale	2.400
Fabbisogno rete AT	2.000
Fabbisogno rete AT + Pompaggio	2.290
Pompaggio (Anapo)	290
Termoelettrico	-1.555 ¹
Idrico (Anapo)	-80 ¹
Eolico rete AT	-800 ¹ { Sambuca - C. Eracle: -161 Rete AT: -639
Fotovoltaico rete MT/bt	-400 ¹
Transito Sorgente – Rizziconi	0
Transito Sicilia – Malta	145

¹ Il segno meno contraddistingue la potenza prodotta

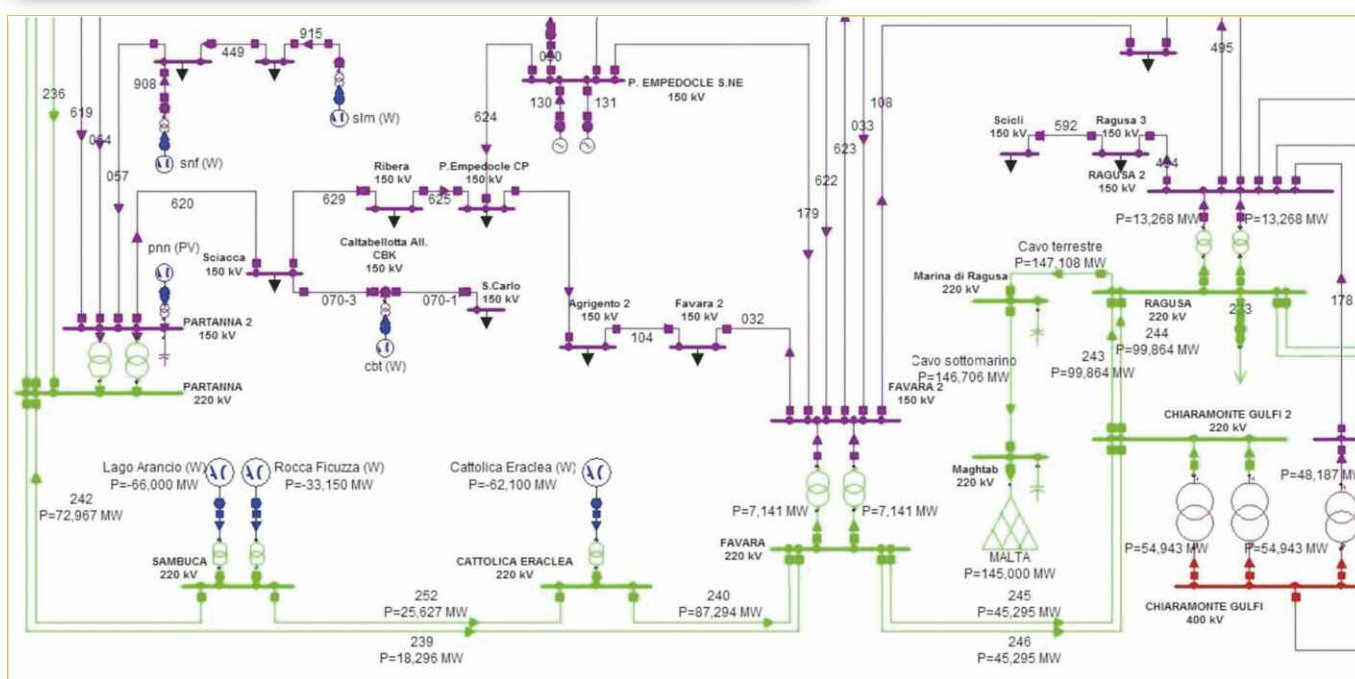


Figura 7 Simulazione scenario "eolico 2" - Transiti di potenza nella dorsale a 220 kV Partanna-Chiaramonte Gulfi.

rebbe invece interessato da un transitorio meno severo di sovralfrequenza che sarebbe fronteggiato grazie al rapido distacco automatico di produzione (tramite l'apparecchiatura UPDM, Unità Periferica per la Difesa ed il Monitoraggio), di entità uguale al flusso in esportazione interrotto. In tal caso, la priorità di disconnessione sarà data alla produzione da FRNP connessa in AT e nel caso non fosse sufficiente verrebbero disconnessi anche generatori tradizionali.

Conclusioni

Il presente articolo ha sintetizzato le principali caratteristiche tecniche e di esercizio del nuovo collegamento in cavo a 220 kV in c.a. tra la Sicilia e Malta che, con i suoi 100 km circa (su uno sviluppo totale di 118,75 km), rappresenta l'interconnessione sottomarina in corrente alternata più

lunga al mondo. La realizzazione dell'opera permetterà di assicurare un'alimentazione più stabile al sistema elettrico maltese in aggiunta alla gestione più flessibile del parco di produzione elettrica siciliano, favorendo in particolar modo il dispacciamento degli impianti alimentati da FRNP.

Lo studio svolto, i cui risultati sono stati sintetizzati nella seconda parte dell'articolo, hanno evidenziato come la produzione eolica siciliana potrà contribuire alla fornitura di energia per le isole maltesi, favorendo lo sviluppo e l'integrazione in Sicilia di impianti alimentati da FRNP.

Infine sono state prospettate alcune possibili criticità che potranno insorgere, in assetto di isola di frequenza del sistema elettrico siciliano, soprattutto in caso di apertura improvvisa del nuovo collegamento Sicilia-Malta. Tali criticità saranno in parte risolte con l'entrata in servizio del raddoppio del collegamento Sorgente-Rizziconi.

bibliografia

[1] **Iliceto A., De Zan R., Rebolini M.:** *Interconnessioni elettriche italiane: innovazione per lo sviluppo del sistema.* L'Energia Elettrica, Vol. 90, n. 6, novembre-dicembre 2013, p. 21-28.

[2] **Biondi S., Carlini E.M., Delfanti M., Vergine C., Quaciari C.:** *Possibili sviluppi della RTN in Sicilia per massimizzare il dispacciamento di energia eolica.* L'Energia Elettrica, Vol. 88, n. 5, settembre-ottobre 2011, p. 9-20.

[3] **Carlini E.M., Favuzza S., Ippolito M.G., Madonia A., Massaro F., Quaciari C.:** *Le fonti rinnovabili in Sicilia: impatti sul mercato zonale e sulla gestione del sistema elettrico.* L'Energia Elettrica, Vol. 92, n. 5, settembre-ottobre 2014, p. 59-69.

[4] **Lauria S., Palone F.:** *Operating envelopes of the Malta-Sicily 245 kV-50 Hz cable.* Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON), 2012 IEEE International, 9-12 Sept. 2012, p. 287-292, Doi:10.1109/EnergyCon.2012.6347769.

[5] **Cacioli L., Cassaro C., Giannuzzi G.M., Prestigiacomo S.,**

Rubino G., Zaottini R.: *Collegamento a 220 kV in c.a. Sicilia-Malta: sistema di protezione ed elenco delle telemisure e telesegnali.* Documento interno Terna Rete Italia.

[6] **Bialek J.:** *Tracing the flow of electricity. Generation, Transmission and Distribution.* IEE Proceedings, Vol. 143, n. 4, p. 313-320 July 1996. Doi: 10.1049/ip-gtd:19960461.

[7] **Favuzza S., Ippolito M. G., Massaro F., Paternò G.:** *Tecniche di tracciamento dei flussi di potenza nei sistemi elettrici di trasmissione: implementazioni e possibili applicazioni per la rete siciliana.* Tesi di laurea magistrale. Università degli studi di Palermo. DEIM - Dipartimento di Energia, Ingegneria dell'Informazione e Modelli Matematici. A.A. 2013-2014.

[8] **Zaottini R., Cassaro C., Buccafusca A., Prestigiacomo S., Giannuzzi G.M.:** *Sicily - Malta 220 kV SubMarine Cable Connection: Network Studies (load-flow, short circuit, stability).* Documento interno Terna Rete Italia.