

**RELAZIONE SU IMPATTI ED ESIGENZE DI REGOLAZIONE DEGLI SCAMBI
DI ENERGIA REATTIVA DA PARTE DELLA RETE DI DISTRIBUZIONE SULLA
RETI IN ALTA E ALTISSIMA TENSIONE**

Indice

1	Executive summary	3
2	Inquadramento generale alle esigenze di gestione dei flussi di potenza reattiva nella rete in alta e altissima tensione	7
2.1	Cenni sul concetto di potenza reattiva e impatti sulla tensione	7
2.2	Distinzione tra flussi di energia reattiva "fisiologici" e "incrementali" e peculiarità tecniche locali nella gestione dei flussi di reattiva "incrementali"	11
3	Analisi quantitativa degli effetti sulla rete di trasmissione dei flussi di energia reattiva da parte dei distributori	13
3.1	Aspetti metodologici ai fini della valutazione degli scambi di energia nei punti di prelievo e di interconnessione in alta e altissima tensione	13
3.2	Evidenze per diverse aree su limitati impatti dei transiti di reattiva da parte dei DSO	14
3.3	<i>OMISSIS</i>	15
4	Dispositivi di compensazione pianificati da Terna.....	16
4.1	Prospettive di evoluzione del sistema elettrico	16
4.2	<i>Overview</i> su strumenti di compensazione previsti da Terna con focus sui compensatori	17
	Appendice A - Sintesi evidenze fornite da Terna, nell'ambito di risposte a consultazioni e studi su volumi reattiva, in merito al carattere puntuale dei transiti di reattiva nei punti di interconnessione tra rete di trasmissione e reti di distribuzione	19

1 Executive summary

La rete di trasmissione è caratterizzata per sua natura da flussi di potenza reattiva correlati ai diversi assetti di esercizio della rete. Tali flussi “fisiologici” sono indipendenti dai prelievi e dalle immissioni di energia reattiva nella rete AT-AAT da parte di clienti finali e distributori e possono essere gestiti, pertanto, solo attraverso interventi di compensazione sulla rete di trasmissione.

In linea generale, l’entità di transiti “incrementali” di reattiva indotti sulla RTN da distributori e clienti finali è estremamente ridotta rispetto a quella dei flussi “fisiologici”, motivo per il quale il loro impatto nella rete in alta e altissima tensione è strettamente dipendente dalle caratteristiche locali della porzione di rete e della connotazione temporale in cui hanno luogo (es. presenza di impianti di produzione in alta tensione, condizioni di alto/basso carico, ecc).

Nell’ambito dello studio sull’andamento dei volumi di energia reattiva relativo agli anni 2019 e 2020, inviato ad ARERA con comunicazione del 5 Novembre 2021 (Protocollo P20210090134), Terna ha condotto prime analisi finalizzate ad identificare, in maniera più puntuale, le aree in cui i volumi di reattiva che risalgono dalla rete MT influiscono negativamente e, in modo non trascurabile, sulla regolazione di tensione della rete.

Tale analisi, condivise con i diversi distributori ai fini di una pianificazione congiunta degli interventi per il controllo della tensione (prevista ai sensi della Determinazione DIEU 2/2021), ha consentito di circoscrivere il perimetro delle aree critiche ad alcune grandi aree metropolitane per via del processo di cavizzazione delle linee delle reti di distribuzione (che per loro natura producono una importante quantità di energia reattiva capacitiva) e a specifiche aree del Sud Italia, caratterizzate da minor presenza in servizio in esito ai mercati dell’energia di generazione regolante e basso carico.

Sulla base di tali evidenze, in risposta alla consultazione 515/21, Terna si è espressa contrariamente all’ipotesi di definire (seppur in via transitoria) un corrispettivo per le immissioni di energia reattiva, a carico delle imprese distributrici, unico a livello nazionale che, laddove previsto, rischierebbe di fornire un segnale distorto sugli impatti dei transiti “incrementali” di potenza reattiva e sulle reali necessità di interventi di compensazione da parte degli utenti.

Per tale ragione, sempre in risposta alla consultazione, Terna ha espresso parere favorevole ad una evoluzione dei corrispettivi in forma differenziata per aree o cluster di cabine primarie e utenti AT, al fine di tener conto dei diversi impatti che le immissioni e i prelievi di reattiva generano sulla rete RTN a livello locale.

A tal fine, Terna ha avviato con il Politecnico di Milano analisi volte a definire – ai sensi della Determinazione DIEU 17 febbraio 2022 n.1/2022 - una metodologia per individuare i nodi della rete rilevante i cui gli scambi (immissioni o prelievi) di energia reattiva abbiano sostanzialmente il medesimo impatto sui costi di rete, definendo così possibili aree omogenee ai fini della regolazione tariffaria dell’energia reattiva.

Nelle more del completamento entro il 30 settembre di tale metodologia, che prevederà un'analisi estesa su tutta la rete nazionale con riferimento ai nodi di alta e altissima tensione, con il presente documento Terna intende fornire – oltre ad un inquadramento generale delle problematiche relative alla regolazione di tensione sulla rete di trasmissione – primi elementi di carattere quantitativo sugli impatti dei flussi di potenza reattiva immessi/assorbiti dalle imprese distributrici e dagli utenti finali connessi in alta tensione¹, sui risvolti d'esercizio e sulla gestione delle tensioni, rispetto ad alcune specifiche porzioni e configurazione di rete. In tal senso, l'analisi riportata all'interno del presente documento è da ritenersi preliminare rispetto alla metodologia più generale in corso di elaborazione con PoliMI, che è stata concepita nell'ottica di un processo condiviso, che vedrà la partecipazione, oltretutto dell'Autorità, anche di tutti i distributori sull'intero perimetro nazionale.

Per fornire inoltre una valutazione a livello più aggregato degli effetti sulla RTN dei transiti "incrementali" di energia reattiva, nel documento è riportata anche un'analisi sull'evoluzione dei costi della attività di dispacciamento utile a comprendere meglio l'impatto della gestione operativa dei vincoli a rete integra e il beneficio derivante dai sistemi di compensazione effettuati da Terna.

Si riporta di seguito una sintesi delle conclusioni che emergono da tali analisi che evidenziano:

- la rete di trasmissione è caratterizzata, per sua natura, da flussi di potenza reattiva "fisiologici", ovvero associati al fatto che nella rete sono presenti elementi strutturali (linee aeree, cavi, trasformatori, eccetera) che, percorsi da correnti e sottoposti a tensioni, assorbono o generano potenze reattive; la compensazione di tali flussi può essere gestita dal TSO solo agendo al livello di AT/AAT. È altresì vero che esistono dei flussi di potenza reattiva "incrementali", ovvero flussi legati ad iniezioni/prelievo di potenza reattiva da parte di utenti o distributori. L'impatto di tali transiti sulle problematiche di tensione RTN risulta molto limitato in termini di volumi e circoscritto comunque a specifiche aree di rete in cui è riscontrabile una *sensitivity* elevata tra potenza reattiva generata da carico e tensione al nodo di riferimento RTN;
- il beneficio in tali aree "critiche" di eventuali interventi di compensazione da parte dei distributori, pur essendo limitato per via del peso ridotto rispetto all'entità complessiva delle problematiche di tensione in gioco, può comunque avere una sua utilità in relazione a siti con problematiche specifiche. A tal proposito, le analisi di più ampio spettro che saranno effettuate congiuntamente con PoliMI forniranno un driver per identificare le specifiche esigenze di rete.
- gli elevati benefici offerti da sistemi di compensazione dinamici (compensatori sincroni, STATCOM), che sono di grande valore aggiunto in quanto funzionali alla risoluzione di più problematiche di rete (anche in chiave prospettica in risposta al processo di transizione ecologica

¹ Nel seguito del documento per brevità ci si riferirà al termine distributori; tuttavia, le considerazioni espresse possono ritenersi valide anche per gli utenti finali connessi alla rete di alta tensione

in corso), indipendentemente dalla tematica specifica della *sensitivity* nodale tra rete di distribuzione e RTN (sia rete di trasmissione che di subtrasmissione);

Quanto sopra peraltro è confermato dagli ultimi mesi di esercizio (ad esempio, primo semestre 2022) in cui si è riscontrato un netto miglioramento nella gestione operativa dei vincoli di tensione, a riprova dell'efficacia dei provvedimenti già realizzati sulla RTN per il controllo dei flussi reattivi.

Con riferimento alla compensazione ottima del reattivo, vengono sintetizzate alcune considerazioni che saranno oggetto di approfondimento nel seguito; in generale vale il criterio di compensare il reattivo in prossimità della zona elettrica in cui viene prodotto. Tale criterio deriva dalla necessità di evitare che il reattivo "viaggi" lungo il sistema² incrementando le perdite e peggiorando i profili di tensione. Coerentemente con questo criterio si ritiene che il reattivo "fisiologico", ossia generato da una rete AT/AAT tendenzialmente scarica, debba essere compensato tramite una strategia di regolazione della tensione che agisca principalmente sulla rete di trasporto, ossia lì dove viene prodotto. Quando però un'area del Distributore manifesta un impatto significativo sulla rete di trasporto, è opportuno valutare l'effetto di un intervento armonizzato TSO/DSO per massimizzare l'efficacia del risultato. Anche in questo caso si opererà in prossimità della sorgente di reattivo, ma agendo al punto di scambio tra TSO/DSO. Restano naturalmente possibili ulteriori interventi sulla rete del Distributori, finalizzati alla risoluzione di problematiche puntuali, ma non facenti parte dello scopo del presente documento. Quanto sopra trova riscontro nel capitolo 3, in relazione alle analisi su *sensitivity* e bilanci di potenza reattiva.

Il documento, oltre alla presente parte introduttiva (Capitolo 1), è così strutturato:

- nel Capitolo 2, sono richiamati alcuni concetti teorici di base sul comportamento delle reti elettriche in funzione di immissioni e assorbimenti di potenza reattiva di distributori e clienti AT, sulla rete di alta e altissima tensione;
- nel Capitolo 3 sono descritti gli esiti di un'analisi quantitativa di *sensitivity* e bilancio di potenza reattiva, condotta a livello esemplificativo su alcuni nodi/aree specifiche di altissima tensione della RTN, che evidenziano gli effetti limitati sul controllo della tensione dei transiti di potenza reattiva indotti dalle Cabine Primarie;
- nel Capitolo 4 sono descritte le famiglie di dispositivi che Terna ha installato e prevede di installare ulteriormente per il controllo della tensione e, più in generale, quale strumento abilitante per la transizione ecologica;
- nell'Appendice A è riportata una sintesi di quanto evidenziato nel corso del tempo da Terna, sia nell'ambito delle risposte a documenti di consultazione sia nell'ambito degli studi sulla potenza

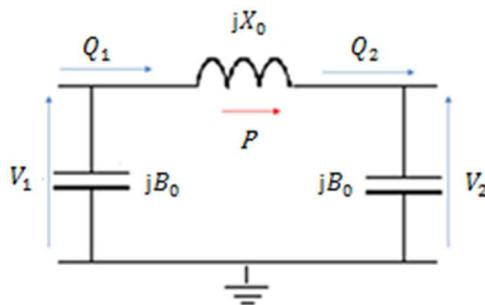
² al netto di alcune aree che, per loro struttura, sono naturalmente attraversate da transiti di reattivo, come meglio approfondito al paragrafo 3.2

reattiva trasmessi all'Autorità, in merito al carattere puntuale dei transiti di potenza reattiva nei punti di interconnessione tra la RTN e le reti di distribuzione.

2 Inquadramento generale alle esigenze di gestione dei flussi di potenza reattiva nella rete in alta e altissima tensione

2.1 Cenni sul concetto di potenza reattiva e impatti sulla tensione

Si consideri lo schema elettrico equivalente monofase semplificato di una linea elettrica trifase di altissima AAT e alta tensione AT in corrente alternata (rappresentato in Figura 1 - schema elettrico semplificato di una linea elettrica di altissima tensione e formule per il calcolo della potenza reattiva agli estremi nel quale si sono trascurate le perdite. La potenza reattiva alle estremità della linea stessa può essere calcolata con le formule seguenti:



$$\begin{cases} Q_1 = V_1^2 \left(\frac{1}{X_0} - B_0 \right) - \frac{V_1 V_2}{X_0} \cos \vartheta_{12} \\ Q_2 = -V_2^2 \left(\frac{1}{X_0} - B_0 \right) + \frac{V_1 V_2}{X_0} \cos \vartheta_{12} \end{cases}$$

Figura 1 - schema elettrico semplificato di una linea elettrica di altissima tensione e formule per il calcolo della potenza reattiva agli estremi

dove:

- Q_i è la potenza reattiva al nodo i della linea;
- V_i è la tensione al nodo i della linea;
- ϑ_{12} è l'angolo di sfasamento delle tensioni tra i due nodi considerati;
- X_0 è la reattanza serie di linea,
- B_0 è la suscettanza parallelo di linea.

Assumendo che non vi siano cadute di tensione per effetto resistivo (ipotesi di linea "senza perdite") e combinando le relazioni di cui sopra, si ricava che la potenza reattiva prodotta (o assorbita) da una linea elettrica è funzione del quadrato della tensione nei nodi di partenza e di arrivo:

$$\Delta Q = f(V_1^2, V_2^2)$$

Le tensioni in partenza e arrivo linea, sono a loro volta correlate alla potenza attiva transitante sull'elettrodotto secondo la seguente relazione:

$$\begin{cases} V_1 = V_2 \sqrt{\cos^2(\beta l) + \left(\frac{P}{P_C}\right)^2 \sin^2(\beta l)} \\ \beta = \frac{2\pi}{\lambda} \end{cases}$$

Dove:

- P è la potenza attiva transitante sull'elettrodotto;
- P_C è la potenza caratteristica della linea;
- l è la lunghezza in km della linea;
- λ è la lunghezza d'onda di tensione che si propaga nella linea di trasmissione (differente a sua volta secondo le caratteristiche della linea, per esempio secondo che sia aerea oppure in cavo).

Se ne conclude, pertanto, che ΔQ è una funzione della tensione di partenza e della potenza attiva transitante sulla linea. In particolar modo, la linea tende ad erogare potenza reattiva quando la potenza attiva transitante è inferiore a quella caratteristica e assorbe potenza reattiva quando la potenza attiva è superiore a detto parametro. La potenza caratteristica è un parametro univoco per ciascun elettrodotto ed è funzione delle sue caratteristiche elettriche. Vista la relazione tra potenza reattiva e tensione, risulta che il punto di funzionamento di un elettrodotto influenza direttamente la tensione al nodo di arrivo. Come evidenziato in Figura 2, laddove la linea eroga potenza reattiva, essa concorre all'innalzamento della tensione; viceversa, quando la linea assorbe potenza reattiva, essa contribuisce alla riduzione della tensione.

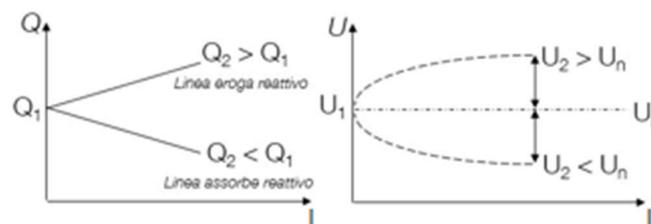


Figura 2 – esempio di andamento della potenza reattiva e della tensione su una linea

Una linea aerea tipica a 400 kV è caratterizzata dai seguenti parametri:

- $r_0' = 0.018$ ohm/km resistenza per unità di lunghezza
- $x_0' = 0.28$ ohm/km reattanza per unità di lunghezza
- $g_0' = 0.005$ μ S/km conduttanza per unità di lunghezza
- $b_0' = 4.084$ μ S/km suscettanza per unità di lunghezza

dove x_0' e b_0' sono rispettivamente i parametri di Figura 1 espressi per unità di lunghezza mentre i parametri r_0' e b_0' , sempre per unità di lunghezza, modellano le perdite di potenza attiva rispettivamente per effetto joule e nel dielettrico e isolatori.

Con riferimento alla Figura 3, si riporta un calcolo effettuato con le seguenti ipotesi:

- Linea 380 kV fascio trinato lunga 100 km, con V_1 e V_2 pari a 410 kV;
- Parametri di linea riportati precedentemente;
- $P_c = 610$ MW (calcolata a 400 kV);
- Q positiva: potenza reattiva complessivamente assorbita dalla linea;
- Q negativa: potenza reattiva complessivamente prodotta dalla linea;
- Variazione della P_2 (Potenza di arrivo) nel range $[0, 2]$ in p.u. della P_c .

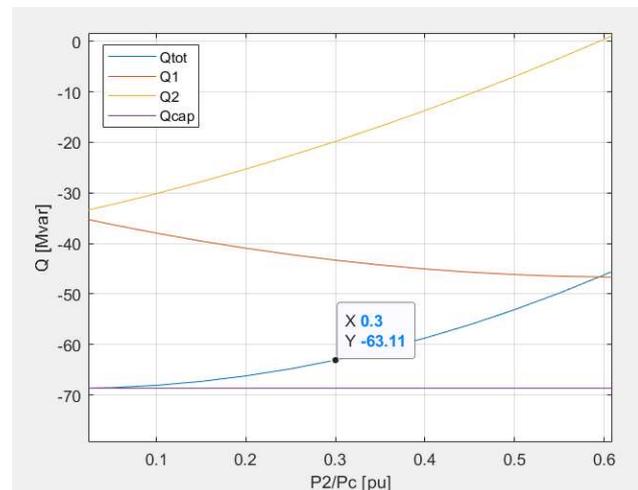
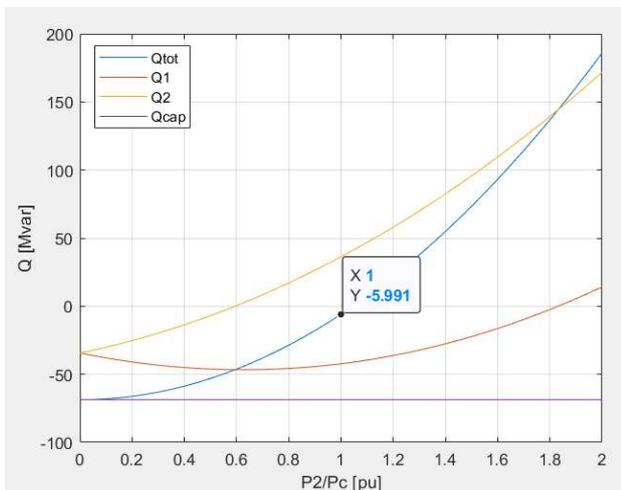
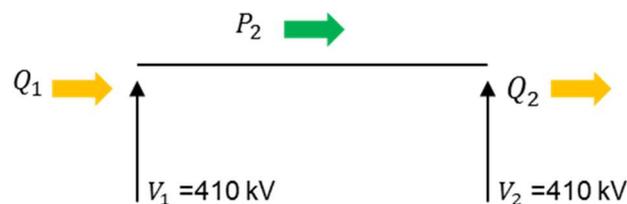


Figura 3: Andamento della potenza reattiva al variare del fattore di carico di una linea elettrica di trasmissione AAT/AT

Nel primo dei due grafici sopra riportati si è rappresentata la funzione $Q\left(\frac{P_a}{P_c}\right)$ nel range di funzionamento compreso tra $[0; 2]$, in p.u. della P_c mentre, nel secondo, si è voluto effettuare un focus sul range $[0; 0.6]$ per dare contezza della potenza reattiva generata quando si opera con flusso di potenza attiva ben al di sotto della potenza caratteristica.

A partire da tale esempio, è possibile verificare come:

- in prossimità della potenza caratteristica, il bilancio reattivo della linea è prossimo allo zero (Q uscente all'estremo di partenza circa uguale alla Q entrante all'estremo in arrivo);
- Per valori superiori alla P_c (linea carica), la linea si comporta globalmente come un'induttanza, assorbendo potenza reattiva;
- Per valori inferiori alla P_c (linea scarica), la linea si comporta globalmente come una capacità, generando potenza reattiva. In particolare, ad un valore di potenza pari al 30% della P_c (circa 180 MW) la potenza reattiva totale prodotta dalla linea è pari a circa 63 Mvar e questa generazione di potenza reattiva aumenta al diminuire della potenza attiva transitante.

Se ne deduce che, ai fini dei bilanci di potenza reattiva, una linea utilizzata fino al 30% della sua potenza caratteristica può essere approssimata come un elemento capacitivo che eroga circa 0,6-0,7 Mvar/km.

Quanto riportato per una linea, può essere esteso ad un modello equivalente, del sistema elettrico interfacciato con le reti di distribuzione. Nella Figura 4 (Figura 3), si vuole descrivere il circuito equivalente del sistema elettrico connesso ad una rete di distribuzione tramite una lunga linea di trasmissione equivalente. Il circuito equivalente è costituito da:

- Un generatore di tensione equivalente in corrente alternata che rappresenta il complesso delle macchine sincrone rotanti afferenti alla RTN, a cui si aggiungono i generatori statici equivalenti (fotovoltaici, eolici connessi tramite inverter, etc.) dotati di inerzia nulla; ad esse si affiancano i compensatori sincroni. Nel complesso, il generatore equivalente avrà una capability complessiva che tiene conto di tutte le componenti di compensazione in reattivo e di produzione in attivo.
- Un circuito π che rappresenta in maniera semplificata l'insieme delle linee e dei trasformatori cui è collegata la Cabina Primaria di cui al punto precedente; detto insieme tiene conto del comportamento rispetto alle potenze reattive della parte strutturale della RTN.
- Un sistema di compensazione passiva, descritto mediante una reattanza derivata X_r .
- La rete di distribuzione e il relativo carico, descritta mediante una impedenza Z_c , con un comportamento variabile nel tempo, risultante dal bilancio tra carichi e produzioni distribuite (prevalentemente passive, ossia non regolanti e non dotate di inerzia) e da una potenza reattiva assorbita o immessa, dipendente da assetti topologici e da peculiarità locali della rete di distribuzione.

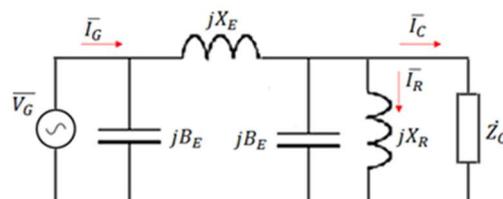


Figura 4 Schema elettrico equivalente semplificato del sistema elettrico

Procedendo da sinistra a destra, sono indicate con:

- V_G il fasore della tensione equivalente imposta dal generatore ideale di tensione schematizzante il sistema di generatori e compensatori sincroni;
- X_E la reattanza equivalente serie del sistema interconnesso di linee elettriche di trasmissione della RTN;
- B_E la suscettanza equivalente parallelo del sistema interconnesso di linee elettriche di trasmissione della RTN;
- X_R la reattanza equivalente parallelo del sistema di compensazione trasversale (per esempio, reattori);
- Z_C impedenza equivalente del carico su rete del distributore interconnesso alla RTN.

Possiamo quindi desumere alcuni concetti che saranno ulteriormente sviluppati nel seguito:

- a seconda del valore di carico attivo richiesto dalla rete di distribuzione, il flusso di potenza attiva transitante sulla rete di trasmissione varia, portando la rete stessa nel suo complesso a manifestare un comportamento induttivo o capacitivo; si noti che la componente attiva di potenza può essere bassa sia in scenari di carico ridotto che in situazioni in cui il carico della rete di distribuzione viene compensata dalla produzione locale;
- a prescindere dal contributo della rete di distribuzione modellizzata con Z_C , la rete di trasmissione è comunque sede di flussi di potenza reattiva “fisiologici”, gestibili al meglio agendo al livello di AT/AAT;
- quando l’accoppiamento tra Z_C e sistema di trasmissione è significativo, ossia si riscontra una *sensitivity* elevata tra la potenza reattiva generata dal carico e la tensione al nodo di riferimento a 400 kV, effettivamente un rifasamento lato distributore ha una sua efficacia. Si tratta tuttavia di casi particolari (nel seguito del rapporto si riportano alcuni esempi).

2.2 Distinzione tra flussi di energia reattiva “fisiologici” e “incrementali” e peculiarità tecniche locali nella gestione dei flussi di reattiva “incrementali”

I flussi di potenza reattiva “fisiologici” sono quelli associati al fatto che nella rete sono presenti elementi strutturali (linee aeree, cavi, trasformatori, eccetera) che, percorsi da correnti e/o sottoposti a tensioni, assorbono o generano potenze reattive; i flussi di potenza legati ad iniezioni di potenza reattiva da parte di utenti o distributori sono invece definiti come “incrementali”.

In relazione agli impatti sulle tensioni delle reti in alta e altissima tensione prodotti da prelievi e immissioni di potenza reattiva da parte degli utenti della RTN e dai distributori, i transiti “incrementali” sono strettamente dipendenti dalle caratteristiche topologiche e temporali della porzione di rete su cui impattano (per esempio, presenza di impianti di produzione in alta tensione, condizioni di alto/basso carico, ecc.).

Ai fini della determinazione dell'impatto dei transiti di potenza reattiva sull'esercizio, va inoltre segnalato che se, rispetto alle quantità complessivamente in gioco nell'area considerata, le iniezioni di potenza reattiva da parte degli utenti e dei distributori sono di ridotta entità, queste ultime saranno di scarso impatto per la regolazione della tensione nel nodo di riferimento.

Come più approfonditamente illustrato nel Capitolo 3, i flussi di potenza reattiva "fisiologici" sono generalmente di entità sensibilmente maggiore dei flussi di potenza reattiva "incrementali", che quindi hanno una influenza limitata ai fini della regolazione di tensione dei nodi di altissima tensione; pertanto, risulta più efficace compensare i flussi "fisiologici" direttamente sulla rete di altissima tensione, ad eccezione di alcuni casi particolari.

3 Analisi quantitativa degli effetti sulla rete di trasmissione dei flussi di energia reattiva da parte dei distributori

3.1 Aspetti metodologici ai fini della valutazione degli scambi di energia nei punti di prelievo e di interconnessione in alta e altissima tensione

Per comprendere meglio la relazione tra i transiti di potenza reattiva nei punti di interconnessione tra reti di distribuzione e la RTN e i relativi impatti sul controllo della tensione, è necessario analizzare il fenomeno a partire dalle caratteristiche tecniche specifiche delle aree in esame.

Ciò può essere effettuato tramite un'analisi di sensitività dell'impatto dello scambio di potenza reattiva per le diverse Cabine Primarie sulla tensione di un nodo di riferimento sulla rete in alta e altissima tensione della RTN.

Come noto, Terna ha già avviato, con il supporto del Politecnico di Milano, analisi in tale direzione con l'obiettivo di definire – ai sensi della Determina n.1/2022 - una metodologia volta ad individuare, a livello nazionale, aree omogenee per le quali si riscontrano impatti simili su nodi di rete identificati come critici. Pertanto, con specifico riferimento ai transiti "incrementali", l'analisi riportata all'interno del presente documento è da ritenersi preliminare rispetto alla metodologia più generale in corso di definizione con PoliMI, che è stata concepita nell'ottica di un processo condiviso, che vedrà la partecipazione, oltretutto dell'Autorità, anche di tutti i distributori sull'intero perimetro nazionale.

All'interno di tali analisi, la cui deadline è prevista per il 30 settembre 2022, infatti, l'attenzione sarà rivolta alla quantificazione, tramite lo strumento della sensitivity, degli effetti che le immissioni di potenza reattiva da parte di DSO e utenti AT hanno sulla totalità della rete (AAT e AT). Ciò sarà possibile attraverso l'identificazione, su tutto il territorio nazionale, di nodi (cd sentinella) che siano rappresentativi di specifiche problematiche delle reti in questione, in relazione ai flussi di potenza reattiva ed alla regolazione della tensione, ad es.:

- nodi caratterizzati da interventi strutturali pianificati da Terna e/o per i quali sono previsti interventi a seguito delle analisi congiunte TSO-DSO
- nodi caratterizzati da profili di tensioni elevate
- nodi rappresentativi di aree in cui è individuabile un importante ricorso a MSD per la selezione di UP in necessarie per la regolazione della tensione di area
- nodi rappresentativi delle problematiche di esercizio, in relazione alla regolazione della tensione, identificati sulla base dell'esperienza degli operatori delle sale controllo e conduzione Terna.

A tal proposito, le analisi di più ampio spettro che saranno effettuate congiuntamente con PoliMI forniranno un driver per identificare le specifiche esigenze di rete. In attesa di consolidare la metodologia ed eseguire le conseguenti analisi, ai fini della presente relazione è stato svolto uno studio preliminare che consente di comprendere, sulla base di alcuni esempi su nodi/aree specifiche

della rete, il tipo di impatto dei volumi di potenza reattiva da parte degli utenti della RTN (e in particolare dei distributori) sulla regolazione della tensione della rete di altissima tensione.

Tali analisi prevedono nell'ordine:

- un'analisi di *sensitivity*, finalizzata a determinare la relazione tra l'immissione o il prelievo di potenza reattiva in corrispondenza di una Cabina Primaria rispetto alla variazione di tensione in un nodo della RTN, e quindi comprendere meglio l'influenza che la potenza reattiva immessa/prelevata da una Cabina Primaria può avere su un nodo della rete di altissima tensione;
- la valutazione del bilancio di potenza reattiva all'interno di una determinata porzione di rete della RTN, finalizzata a confrontare i diversi contributi di potenza reattiva assorbita/erogata dagli elementi di rete presenti al suo interno ed all'apporto dei flussi di potenza reattiva delle Cabine Primarie rispetto a tutti gli altri elementi della rete di alta e altissima tensione.

La combinazione dei due approcci descritti sopra consente di identificare le aree maggiormente caratterizzate da variazioni di tensione sulla rete di altissima tensione dovute all'effetto congiunto delle proprietà strutturali della porzione di rete (per esempio, elevata *sensitivity*) e dei flussi di potenza reattiva immessi o assorbiti dagli elementi di rete e dalle Cabine Primarie.

Per fornire inoltre una valutazione a livello più aggregato degli effetti sulla RTN dei transiti "incrementali" di energia reattiva, è stata condotta un'analisi sulle movimentazioni nel mercato del dispacciamento utile a comprendere meglio l'impatto della gestione operativa dei vincoli a rete integra e il beneficio derivante dagli interventi di compensazione realizzati da Terna.

3.2 Evidenze per diverse aree su limitati impatti dei transiti di reattiva da parte dei DSO

Analisi di *sensitivity*

La metodologia di calcolo delle *sensitivity* sfrutta la formulazione classica di un problema di *power flow* per un sistema elettrico. Le equazioni di *power flow* pongono in relazione le iniezioni di potenza attiva e reattiva con le variazioni in modulo e fase delle tensioni nei nodi del sistema elettrico considerato.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

Identificate le equazioni di stato, attraverso l'opportuna inversione della matrice Jacobiana, è possibile determinare il legame kV/Mvar fra la variazione di tensione ΔV_j misurata nel j-esimo nodo di interesse e il nodo i-esimo dove si ipotizza una variazione unitaria di reattivo ΔQ_i .

Quando il sistema elettrico oggetto di analisi assume un'estensione significativa come quella del sistema elettrico italiano, il numero di coppie $i-j$ rispetto alle quali eseguire il calcolo diventa elevato; è necessario quindi impiegare delle *routine* per l'automatizzazione del calcolo. Tenendo conto che le *sensitivity* decrescono all'aumentare della distanza elettrica tra i nodi $i-j$, è ragionevole limitare i calcoli considerando gruppi di nodi $i-j$ elettricamente vicini.

OMISSIS

3.3 OMISSIS

4 Dispositivi di compensazione pianificati da Terna

4.1 Prospettive di evoluzione del sistema elettrico

L'evoluzione del sistema elettrico italiano nei prossimi anni sarà notevolmente influenzata da un progressivo *phase-out* del parco termoelettrico e da una ancora più marcata riduzione del numero di ore di funzionamento delle singole unità di generazione. In molte ore della giornata e per molte settimane dell'anno, l'esercizio del sistema elettrico sarà caratterizzato da un numero progressivamente sempre più ridotto di unità di generazione programmabili e regolanti in servizio. Riferendosi allo scenario National Trend Italia, elaborato congiuntamente da Terna e Snam e pubblicato a febbraio 2021, si prospetta un incremento considerevole delle fonti rinnovabili non programmabili (RES) installate, con valori massimi al 2030 e al 2040 pari rispettivamente a 19 GW e a 25 GW per l'eolico e 52 GW e 64 GW per il fotovoltaico (valori riportati nel Piano di Sviluppo 2021, Terna). Il pacchetto di proposte della Commissione Europea *FIT for 55* e *RePower UE* superano - in termini di obiettivi di *policy* - i *target* di nuovi impianti rinnovabili da realizzare previsti dai predetti scenari, e saranno considerati negli scenari che saranno utilizzati per il Piano di Sviluppo 2023.

D'altronde, le richieste di connessione di impianti eolici e fotovoltaici alla rete in alta tensione ricevute da Terna (pari al 31.12.2021, con riferimento alle richieste con preventivo accettato, a oltre 40 GW per l'eolico, *on-shore* e *off-shore*, e a circa 60 GW per il fotovoltaico) già indicano un forte interesse del mercato e degli sviluppatori alla realizzazione di predetti impianti. Allo stesso tempo, lo sforzo di semplificazione dei procedimenti autorizzativi su cui il Governo ha concentrato la sua azione nell'ultimo anno, prefigura la concreta possibilità di una forte accelerazione nella realizzazione di un sistema elettrico con una forte penetrazione di rinnovabili.

La crescita importante di impianti RES e la contestuale dismissione di impianti convenzionali – e di riduzione del numero di ore di presenza in servizio dei medesimi impianti - generano conseguenze sul sistema elettrico in termini di:

- riduzione della potenza regolante di frequenza e tensione;
- riduzione della potenza di corto circuito;
- progressiva riduzione dell'inerzia del sistema, con ulteriori problemi di stabilità della frequenza;
- *overgeneration* da impianti rinnovabili in determinate ore del giorno e in particolari condizioni atmosferiche;
- aumento delle situazioni di congestioni di rete a causa della distribuzione disomogenea degli impianti da fonte rinnovabile.

Tutto ciò comporta che, in condizioni di ridotta disponibilità sui mercati di tali risorse, gli asset della rete dovranno contribuire alla regolazione (*in primis* di tensione e potenza di corto circuito, ma anche di inerzia) anche tramite logiche *multi-tasking*; dovranno inoltre essere prese in considerazione opportune tipologie di manovre di rete e nuove macchine di compensazione.

L'esigenza del sistema elettrico è quindi quella di rispondere alle evoluzioni sopra descritte, stabilendo un nuovo paradigma basato sull'abbattimento delle barriere tramite regole operative e soluzioni tecnologiche innovative che, partendo dalla rete, consentano di ottimizzare i Vincoli a Rete Integra e ridurre i costi sostenuti sul Mercato dei Servizi di Dispacciamento.

4.2 Overview su strumenti di compensazione previsti da Terna con focus sui compensatori

L'esigenza sopra descritta necessita di un piano di mezzi di compensazione e regolazione che possano consentire un esercizio stabile del sistema elettrico nel nuovo scenario di produzione a forte penetrazione di produzione rinnovabile non programmabile; a tal fine, Terna ha predisposto un piano di installazione di reattori, compensatori sincroni e STATCOM atto a permettere questa evoluzione.

I reattori sono la prima linea di controllo del reattivo e offrono una regolazione discreta (a gradini) e unidirezionale (solo assorbimento) che rappresenta una compensazione di base, distribuita sulla RTN, affiancandosi alla regolazione (continua e bidirezionale) offerta dalla generazione convenzionale e consentendo di creare un margine sulle macchine rotanti.

Gli STATCOM consentono una regolazione del reattivo estremamente rapida, bidirezionale e continua, rappresentando una regolazione fine, contrastando i buchi di tensione e stabilizzando il sistema con una legge di regolazione che reagisce alle piccole oscillazioni della rete.

Per quanto riguarda i compensatori sincroni, essi costituiscono il "serbatoio" di potenza reattiva che sfrutta le caratteristiche tipiche delle macchine sincrone; si deve tuttavia sottolineare che la possibilità di controllare la potenza reattiva è solo una delle caratteristiche messe a disposizione da queste macchine. Entrando più nello specifico, i compensatori sincroni sono caratterizzati dalle seguenti proprietà, a beneficio del sistema elettrico:

- Inerzia meccanica, potenziata eventualmente tramite un volano aggiuntivo, che consente di realizzare un valore di costante di inerzia di 7 secondi, pari a quanto messo a disposizione da una turbina/generatore turbogas di una centrale a ciclo combinato o, se si preferisce, al doppio di una turbina/generatore a vapore convenzionale.
- Aumento della potenza di cortocircuito, grazie al comportamento in regime subtransitorio, facilitando l'azione dei sistemi di protezione, arginando la propagazione dei buchi di tensione e

mitigando l'effetto dei transitori di reattivo. L'effetto di cui sopra garantisce inoltre un funzionamento stabile degli HVDC diminuendo l'incidenza di fenomeni di *commutation failure*.

- Controllo della stabilità transitoria della rete elettrica, grazie alla risposta pronta e smorzata a fronte di brusche variazioni della tensione/potenza reattiva; queste apparecchiature reagiscono in modo ottimale combinando l'effetto del controllo istantaneo della potenza reattiva alla risposta inerziale che, come noto, sono fondamentali nel controllo della stabilità.
- Contributo alla stabilità di area in caso di cortocircuito, grazie alla capacità di raggiungere molto rapidamente, in condizioni di rete perturbata, la tensione massima di eccitazione (*ceiling*) che partecipa al sostegno della rete stessa durante il transitorio.
- Smorzamento delle oscillazioni interarea, sensibilmente in aumento in altre aree della rete europea (es. penisola iberica) a causa del costante aumento della generazione *inverter-based* e conseguentemente dei transiti dalla periferia del sistema verso il centro; tale beneficio è reso possibile anche grazie ad una funzione *Power System Stabilizer* sviluppata da Terna ed a nuove tecniche di controllo *WIDE* tuttora in sperimentazione.
- Regolazione dei flussi "fisiologici" di energia reattiva correlati agli assetti di esercizio della RTN e, come tali, indipendenti dai flussi "incrementali" indotti dai distributori e dai clienti finali.
- Supporto alle procedure di riaccensione e rialimentazione della rete, creando aree di rete stabili ed autosufficienti da un punto di vista della potenza di cortocircuito ed inerzia e limitando le sovratensioni che potrebbero rendere difficoltose le condizioni di esercizio.
- Aumento della probabilità di successo del piano di alleggerimento in condizioni di emergenza, grazie alla mitigazione delle sottoelongazioni di frequenza e di RoCoF (Rate of Change of Frequency) oltre che alla capacità di smorzare gli sbalzi di potenza reattiva causati dal distacco dei carichi.
- Incremento del tasso di sopravvivenza delle isole elettriche che si vengono a creare durante un transitorio di ampia separazione di rete (per esempio, evento del 8 gennaio 2021 occorso nell'area Sud Est dell'Europa continentale).

Quanto sopra argomentato dimostra che:

- il controllo della potenza reattiva è solo una delle numerose caratteristiche messe a disposizione dalla compensazione rotante;
- i compensatori sincroni si affiancano agli STATCOM e ai reattori nell'ottica di un processo di regolazione del sistema che sfrutta le caratteristiche peculiari di ogni elemento di controllo, tutte comunque necessarie per un piano di regolazione organico;
- non è possibile confrontare o sostituire al contributo di uno dei mezzi di compensazione adottati da Terna con un'azione di regolazione da parte delle reti di distribuzione, poiché si perderebbero tutti i vantaggi descritti sino ad ora, vitali per un esercizio in sicurezza del sistema elettrico;
- il piano di installazione dei mezzi di compensazione deve incrementare via via che prosegue l'attivazione di nuova generazione *inverter-based* e il *decommissioning* di impianti convenzionali.

Per quanto detto, ne consegue che, seppur in presenza di un rapporto tra benefici e i costi dei sistemi di compensazione molto elevato non è possibile – a meno di ipotesi non rigorose e parziali – individuare puntualmente il beneficio associato all'installazione dei compensatori sincroni delle sue

varie componenti e/o funzionalità. A ciò si aggiunge il fatto che non è possibile confrontare performance di tipo statico con performance dinamiche.

Appendice A - Sintesi evidenze fornite da Terna, nell'ambito di risposte a consultazioni e studi su volumi reattiva, in merito al carattere puntuale dei transiti di reattiva nei punti di interconnessione tra rete di trasmissione e reti di distribuzione

Nella risposta al documento per la consultazione 515/2021/R/eel, Terna si è espressa in modo favorevole alla proposta presentata dagli Uffici dell'Autorità in merito ad una possibile definizione di corrispettivi per l'energia reattiva a carico di distributori e utenti connessi in alta e altissima tensione, differenziati per aree territoriali (es. cluster di Cabine Primarie) in funzione dei diversi impatti che le immissioni o i prelievi di reattiva generano sulla RTN a livello locale.

L'opportunità di un ricorso ad un approccio basato sulla differenziazione dei fattori di potenza rispetto alle esigenze delle singole porzioni di rete, volto a fornire i corretti segnali di prezzo ai distributori in merito agli investimenti effettivamente necessari in un'ottica di efficienza di sistema, era già stato espresso da Terna in passato in occasione (i) sia delle risposte a precedenti consultazioni sul tema (ii) sia degli studi relativi all'analisi dei quantitativi di energia reattiva immessa e prelevata nella rete rilevante dai distributori.

Con riferimento al primo punto si segnala infatti che già nel 2011 (in risposta alla consultazione n.13/11), Terna aveva auspicato nel futuro una gestione dello scambio di reattivo tra reti di distribuzione e di trasmissione *"maggiormente flessibile e continua (...) in modo da realizzare una regolazione congiunta che massimizzi la reciproca capacità di regolazione e, conseguentemente, riduca gli oneri associati all'installazione di dispositivi di compensazione del reattivo sulle reciproche reti"*.

Tale indicazione è stata meglio dettagliata nel 2016 (in occasione della risposta al documento di consultazione n. 420/16/R/eel) laddove si evidenziava che *"sotto il profilo tecnico (...) le criticità ed i costi legati alla gestione della potenza reattiva hanno carattere fortemente locale e variabile nel tempo, dipendendo dalla struttura della rete, dalla presenza e dalle caratteristiche di carichi ed immissioni locali e dalla potenza di corto circuito"*, motivo per il quale si richiedeva esplicitamente la possibilità di *"discriminare i valori del fattore di potenza non solo con riguardo alla dimensione geografica (chiedendo specifici valori del fattore di potenza a distributori e clienti finali localizzati in specifici nodi) ma anche con riguardo alla dimensione temporale"*.

Tale richiesta trovava fondamento dalle prime analisi sugli impatti del reattivo sviluppate in collaborazione con il Politecnico di Milano che, seppur relative a pochi casi studio, aveva già portato ad evidenziare nelle conclusioni dello studio sui volumi di reattiva allegato al documento di

consultazione 420/16/R/eel come *“la condizione $\cos\phi=1$ non è sempre ottimale”* in quanto *“non esiste un unico intervallo di variazione del $\cos\phi$ valido per tutte le condizioni di carico e per tutti i nodi della RTN che permetta di contenere le tensioni all’interno dei limiti accettabili”*

Inoltre, in occasione dell’aggiornamento dello studio sui volumi realizzato nel 2021, grazie all’affinamento della metodologia di analisi Terna ha quindi circoscritto più puntualmente le aree critiche *“rispetto alle quali il contributo di reattivo che risale dalla rete MT influisce negativamente sulla regolazione di tensione della rete primaria (...) limitate solo ad alcune grandi aree metropolitane (...), nonché ad alcune specifiche aree del Sud Italia (...)”*.

Sulla base di tali evidenze, in risposta alla consultazione 515/21/R/eel, Terna si è quindi espressa contrariamente all’ipotesi di definire (seppur in via transitoria) un corrispettivo per le immissioni di energia reattiva, a carico delle imprese distributrici, unico a livello nazionale, suggerendo invece un’articolazione distinta per aree.

Da ultimo, si segnala che, con riferimento agli aspetti relativi alla localizzazione dei compensatori sincroni previsti da Terna nell’ambito del Piano di Sicurezza, sempre nell’ambito nella risposta al documento di consultazione 515/2021/R/eel Terna ha avuto modo di precisare le diverse finalità di tali dispositivi tra cui *“il sostegno al processo di transizione energetica in corso che vedrà una sempre maggiore riduzione di generatori sincroni di grossa taglia (es. impianti a carbone) più a favore di una forte penetrazione di generazione di tipo rinnovabile inverter-based”*.