

**POLITECNICO DI MILANO**

*Dipartimento di Energia*



---

*Relazione del progetto commissionato da:*

*Autorità per l'energia elettrica e il gas*

**Impatto della Generazione Diffusa sulle reti di distribuzione BT:  
esiti delle analisi su un campione ridotto**

**Responsabili**

ing. Maurizio Delfanti

ing. Marco Merlo

prof. Andrea Silvestri

*Novembre 2010*

PAGINA BIANCA

## Indice

- 1 Introduzione
- 2 Contesto regolatorio e normativo nazionale
- 3 Campione di reti impiegato
  - 3.1 Dati forniti dai Distributori
  - 3.2 Elaborazione e completamento dati con ipotesi sul profilo di carico
  - 3.3 Correlazione con le reti MT
- 4 Analisi di hosting capacity nodale
  - 4.1 Criticità legate alla regolazione di tensione
    - 4.1.1 Generalità
    - 4.1.2 Risultati
  - 4.2 Portate a regime e limiti di transito
    - 4.2.1 Generalità
    - 4.2.2 Risultati
  - 4.3 Variazioni rapide di tensione
    - 4.3.1 Generalità
    - 4.3.2 Risultati
- 5 Analisi di linea e di rete
  - 5.1 Correnti di cortocircuito e tenuta elettromeccanica dei componenti
    - 5.1.1 Generalità
    - 5.1.2 Risultati
  - 5.2 Correnti di cortocircuito date dalla GD e protezioni di linea
    - 5.2.1 Protezioni delle linee BT di distribuzione
    - 5.2.2 Protezioni da cortocircuito e limiti associati
    - 5.2.3 Risultati
  - 5.3 Inversione di flusso e isola indesiderata
- 6 Conclusioni
  - 6.1 Vincoli sulla quantità massima di potenza installabile in ciascun nodo
  - 6.2 Vincoli sulla quantità massima di potenza installabile a livello di singola rete e di linea
  - 6.3 Alcune considerazioni finali: possibili interventi sulla rete per superare gli attuali vincoli.

PAGINA BIANCA

## 1 Introduzione

L'aumento della Generazione Diffusa<sup>1</sup> (GD) nelle reti elettriche di distribuzione BT<sup>2</sup>, dovuto prevalentemente alla crescente installazione di impianti fotovoltaici anche di piccole dimensioni<sup>3</sup>, richiede approfondimenti finalizzati ad individuare gli effetti tecnici che si possono avere sulle reti di distribuzione stesse. Questo studio ha quindi lo scopo di valutare, in modo quantitativo, pur su un campione ridotto di reti di distribuzione BT, il massimo livello di penetrazione della GD (inteso come massima potenza installabile) compatibile con l'attuale struttura delle reti BT stesse.

Lo studio rappresenta la naturale continuazione dell'indagine sul sistema di distribuzione in MT, a suo tempo refertata nell'Allegato 2 della Delibera ARG/elt 25/09 (indagine basata su un campione esteso di 400 reti, da qui in poi richiamata anche come *studio MT*): tutte le metodologie impiegate sono quelle già dettagliate nelle analisi MT e adattate, dove necessario, alle reti di distribuzione BT.

L'indagine sulla quantità massima di GD installabile sul sistema di distribuzione in BT è svolta su un insieme ridotto di reti reali derivato a partire dal campione descritto nella Delibera ARG/elt 81/10; da tale campione esteso, costituito da oltre 500 Cabine Secondarie (nel seguito, CS)<sup>4</sup>, ne sono state estratte 16 secondo logiche atte a rappresentare diversi ambiti e diverse potenze nominali di trasformazione MT/BT.

Dopo una specifica elaborazione del campione, nella quale sono state introdotte alcune ipotesi necessarie a stimare il livello di carico delle reti, è stata eseguita un'analisi nodale di penetrazione della GD tramite algoritmi basati su calcoli di load flow. In linea con le criticità sottolineate nella delibera ARG/elt 25/09, è stata determinata la potenza massima installabile in funzione di una serie di vincoli tecnici che tengono conto delle attuali strategie di gestione della rete e dell'attuale situazione normativa (soprattutto in relazione alle vigenti norme di power quality). Si è determinata la massima GD che vi si può connettere, compatibilmente con i vincoli di seguito elencati<sup>5</sup>.

- *Variazioni lente di tensione*: il valore della tensione a regime nei nodi di rete deve essere compreso entro un intervallo predefinito del  $\pm 10\%$  (EN 50160).

<sup>1</sup> Si preferisce associare all'acronimo GD il significato di "Generazione Diffusa" in luogo del più comune "Generazione Distribuita".

<sup>2</sup> Nel "Monitoraggio dello sviluppo degli impianti di generazione distribuita per l'anno 2009", a cui questo studio è allegato, è possibile vedere come tra il 2009 e il 2008 ci sia stato un aumento del 120% del numero di sezioni di impianti di produzione collegati in BT.

<sup>3</sup> La prevalenza di impianti fotovoltaici è dovuta anche ai sistemi di incentivazione ad oggi vigenti (cfr. Conto Energia e Nuovo Conto Energia 2011-2013).

<sup>4</sup> A loro volta alimentate da un sottoinsieme delle 400 reti MT impiegate ai fini dello studio riportato in allegato alla Delibera ARG/elt 25/09.

<sup>5</sup> Maggiori dettagli sulle metodologie impiegate sono disponibili in: "Limits to dispersed generation on Italian MV networks", M. Delfanti, M. S. Pasquadisceglie, M. Pozzi, M. Gallanti, R. Vailati, proceedings of CIRED 2009.

- *Portata a regime delle linee BT*: su nessun tratto di linea deve essere superato il limite massimo di corrente (limite termico delle condutture).
- *Variazioni rapide di tensione*: la variazione della tensione nei nodi di rete in fase di transitorio non deve superare una soglia prefissata (5% o 10% secondo le indicazioni della EN 50160).

La GD viene simulata installando sulla rete un solo generatore per volta, di potenza crescente fino ad un limite massimo predefinito; tale generatore è posizionato, progressivamente, a partire dalla sbarra BT di Cabina Secondaria, su tutti i nodi di tutte le linee sottese. La taglia massima implementata per gli impianti di generazione (300 kW<sup>6</sup>), pur essendo ben superiore alle taglie usualmente riscontrabili sulle reti BT (specialmente lungo linea), permette di esplorare vincoli nodali che, nella realtà pratica, potrebbero essere raggiunti per mezzo di più generatori, installati in nodi diversi della stessa linea BT.

Successivamente è stata condotta un'analisi per valutare la massima potenza globalmente installabile per ciascuna rete o linea, simulando la presenza di un generatore equivalente collegato direttamente alla sbarra BT di Cabina Secondaria. Si è così determinata la massima GD collegabile sulla rete nel rispetto dei vincoli di seguito elencati.

- *Incremento della corrente di cortocircuito*. La GD determina un aumento della corrente di cortocircuito che interessa le linee e i nodi della rete. Essa deve essere mantenuta al di sotto del potere di interruzione degli organi di manovra BT, sia del Distributore, sia degli Utenti.
- *Scatto intempestivo delle protezioni della linea sana per effetto della GD*. L'eccessivo contributo alla corrente di guasto fornita dalla GD di un dato feeder potrebbe condurre a scatti intempestivi della protezione in testa ad una linea sana, in caso di cortocircuito su una linea diversa<sup>7</sup>. Esiste infatti un legame diretto fra la GD installata sulla linea e il valore massimo della corrente di guasto trifase, che deve essere inferiore alla soglia fissata per le protezioni da cortocircuito.

<sup>6</sup> Si sceglie un valore superiore rispetto ai 200 kW indicati nel Progetto CEI 1058 (Progetto di Norma CEI uscito in inchiesta pubblica analogo per la BT della Norma CEI 0-16) in modo da valutare i possibili effetti che potrebbero avere sulla rete, con particolare riferimento agli aspetti di continuità e qualità del servizio, impianti di GD con potenze elevate. In particolare, la taglia massima implementata nelle analisi nodali coincide con il 50% in più della potenza limite indicata in norma.

<sup>7</sup> La linea su cui è presente la GD sarebbe infatti disalimentata per effetto di un guasto su una linea diversa attestata alla stessa sbarra di CS.

Infine sono riportate alcune considerazioni legate all'inversione di flusso e all'isola indesiderata, che sulle reti di distribuzione BT non rappresentano un problema critico quanto sulle reti MT, essenzialmente per la minore presenza di sistemi di automazione.

Ciononostante, la possibilità di sostenere, mediante la GD connessa sulle reti BT, l'isola indesiderata sul livello MT merita di certo attenzione.

I vincoli relativi alle variazioni rapide di tensione e all'incremento delle correnti di cortocircuito non dipendono, in prima battuta, dalle ipotesi fatte per stimare il carico elettrico sui nodi di ciascuna rete. Viceversa, la valutazione dei vincoli associati ai limiti termici delle linee e alle variazioni lente di tensione è influenzata anche dalle ipotesi adottate per la ricostruzione del carico elettrico.

È quindi necessario precisare che i risultati presentati in questa analisi, basata su un campione ridotto di reti (peraltro identificate secondo logiche atte a rappresentare le diverse macro-configurazioni più comunemente riscontrabili nel contesto nazionale), e con un profilo di carico ricostruito, sono da intendersi come una stima approssimata, che troverà riscontro definitivo solo a valle di ulteriori analisi di dettaglio, effettuate su un sottoinsieme più ampio del campione descritto nella Delibera ARG/elt 81/10, e corroborate dall'impiego di profili di carico misurati.

## 2 Contesto regolatorio e normativo nazionale

Come già fatto nello studio MT, anche ai fini delle analisi di seguito riportate si preferisce definire il fenomeno in esame come “Generazione Diffusa” (GD), a sottolineare la natura non prevedibile e non preordinata della dislocazione spaziale e temporale delle immissioni di potenza sulla rete elettrica, e utilizzare come definizione di GD quella riportata nella Delibera AEEG n. 160/06 (e la successiva 328/07).

Nel seguito ci si riferirà alla GD ricomprendendo in tale acronimo in particolare la piccola generazione, che è costituita da tutti gli impianti per la produzione di energia elettrica, anche in assetto cogenerativo, con capacità di generazione non superiore a 1 MW (è un sottoinsieme della GD).

Tale limite è congruente con quanto contenuto nell’ambito della normazione tecnica vigente: infatti, la norma CEI 0-16 (ed. II, allegato A della Delibera ARG/elt 119/08) riporta un limite indicativo, per la connessione in BT degli Utenti attivi, pari a 100 kW.

Anche la Delibera ARG/elt 99/08 (e la successiva integrazione Del. ARG/elt 125/10), recante il *Testo Integrato delle Condizioni tecniche ed economiche per la connessione alla reti con obbligo di connessione di terzi degli impianti di produzione* (c.d. TICA), esplicita che il servizio di connessione alle reti di distribuzione deve essere erogato al livello BT nel caso di richieste di connessione per potenze in immissione fino a 100 kW<sup>8</sup>.

Infine, la più recente inchiesta pubblica Progetto CEI 1058, contenente la “Regola tecnica di riferimento per la connessione di Utenti attivi e passivi alle reti BT delle imprese distributrici di energia elettrica”, individua 30 kW come valore indicativo di potenza da GD connettabile lungo linea e 200 kW come il limite massimo per le reti BT<sup>9</sup>.

Questa futura norma, che completa il quadro tecnico regolatorio relativo alle reti di distribuzione BT, ha lo scopo di consentire la connessione di Utenti attivi e passivi alla rete BT, e contiene importanti novità nella direzione delle reti attive, come:

- nuovi requisiti per il Sistema di Protezione di Interfaccia (SPI);
- alcuni servizi di rete richiesti alla GD (per es. la regolazione di tensione);
- la prospettiva di impiegare sistemi di comunicazione tra Utente e Distributore.

<sup>8</sup> Nel medesimo TICA, è comunque lasciata facoltà al Distributore di connettere al livello BT utenze attive per potenze superiori a 100 kW. È inoltre previsto che un Utente passivo con una data potenza disponibile in prelievo (per esempio, 150 kW in BT) possa immettere lo stesso valore di potenza qualora divenga Utente attivo.

<sup>9</sup> Nella fascia tra 100 e 200 kW, la scelta di connettere un Utente attivo alla rete BT o MT è demandata al Distributore, tenendo in considerazione le condizioni della rete al contorno.

### 3 Campione di reti impiegato

Le informazioni topologiche ed elettrotecniche delle reti BT<sup>10</sup> impiegate nelle analisi sono state derivate da un campione di dati appositamente raccolto, come riportato nel capitolo 5 dell'Allegato A alla Delibera ARG/elt 81/10. Nel seguito si danno alcuni dettagli circa i dati utilizzati per lo studio.

#### 3.1 Dati forniti dai Distributori

Tutte le reti di distribuzione BT hanno una **struttura radiale**, ciò ha permesso di definire una procedura di acquisizione dati basata sul legame tra un nodo ed il suo diretto precedente (nodo immediatamente a monte, dal quale - nel contesto di reti passive - proviene l'alimentazione al carico). La struttura di acquisizione dati adottata contiene informazioni tali da descrivere le caratteristiche di ciascun nodo ed il legame topologico con il resto della rete.

Ogni nodo mappato della rete di distribuzione risulta caratterizzato da una serie di informazioni: quelle di maggiore rilievo per il presente studio sono riassunte nella Tabella 1. Ogni nodo risulta pertanto descritto in modo univoco rispetto a tutti gli altri della rete.

<i>Codice ambito territoriale di appartenenza</i>
<i>Codice della rete su cui si attesta la linea a cui appartiene il nodo</i>
<i>Codice linea BT cui appartiene il nodo</i>
<i>Tipo di nodo: "Trasformazione secondaria", "Smistamento", "Cliente BT" (ulteriormente suddiviso in mono-trifase domestico o non domestico, e illuminazione pubblica)</i>
<i>Tensione nominale (in V)</i>
<i>Potenza disponibile in prelievo (kW) o Potenza nominale trasformatore (kVA) per CS</i>
<i>Conduttori di linea: lunghezza (in km), resistenza (Ohm) e reattanza (Ohm)</i>

Tabella.1. Informazioni fornite per ogni nodo delle reti appartenenti al campione in analisi.

<sup>10</sup> Per *rete BT* si intende l'insieme di nodi elettrici e linee sottese a una sbarra BT di Cabina Secondaria.

### 3.2 Elaborazione e completamento dati con ipotesi sul profilo di carico

Il campione BT, costruito a partire dalla procedura illustrata nella Delibera ARG/elt 81/10, è costituito da 500 reti, circa l'1% dell'intero sistema di distribuzione BT nazionale, e comprende dati reali relativi a reti di diversi Distributori, collocate su tutto il territorio italiano, di diversa grandezza e composizione, che includono ambiti ad alta, media e bassa densità di carico.

Le tabelle elaborate dai Distributori hanno però evidenziato alcune disomogeneità nella compilazione delle informazioni tali da impossibilitare l'acquisizione automatica dei dati mediante il programma di calcolo implementato.

Queste difficoltà hanno condotto a una riduzione del campione: infatti, a partire dalle 500 sbarre BT di Cabina Secondaria per le quali sono stati richiesti i dati, si è quindi ritenuto di ricostruire la topologia di un set ridotto di reti BT, partendo dai dati contenuti nelle 18 classi, ottenute incrociando le 3 tipologie di ambito territoriale (alta, media, bassa densità di carico) con le 6 taglie di trasformatore MT/BT più ricorrenti (50, 100, 160, 250, 400 e 630 kVA). Poiché 2 delle 18 classi non presentano alcuna rete, si sono ottenute 16 reti BT che costituiscono il **campione ridotto** su cui sono effettuate le analisi.

Le elaborazioni nel seguito presentate fanno dunque riferimento al solo campione di dati ritenuti congruenti; è infatti risultato impraticabile al momento l'inserimento dell'intera base di dati raccolta e la conseguente elaborazione automatica.

I dati acquisiti sulla base della struttura sopra dettagliata sono stati processati mediante algoritmi dedicati, al fine di ricostruire in maniera opportuna lo schema topologico di ciascuna delle reti analizzate. Una volta individuati i nodi terminali delle varie dorsali, è stato sviluppato un procedimento che, andando a ritroso, ricollega ogni nodo a quello immediatamente precedente, fino alla sbarra BT di CS: in tale modo è stato possibile riottenere l'intero percorso di tutti i feeder.

In questa fase è stato necessario effettuare alcune ipotesi sulla struttura di rete. In particolare, data la mancanza di dati esaustivi forniti dai Distributori, si è ipotizzato che tutti i conduttori di linea e tutti i carichi collegati siano trifase<sup>11</sup>, inoltre si è deciso di trascurare tutti i parametri derivati<sup>12</sup>.

L'ultima ipotesi adottata è relativa alla modellizzazione dei carichi sulla rete: risulta necessario stimare (pure in modo approssimato) il profilo di carico di ciascuna utenza, simulando le diverse condizioni di lavoro di un anno di funzionamento. Per valutare il comportamento della rete

<sup>11</sup> Di fatto questa ipotesi risulta sempre verificata per i collegamenti che costituiscono la dorsale di linea, mentre non rappresenta fedelmente i tratti di linea estremi verso gli Utenti finali domestici. Peraltro, l'eventuale sostituzione di tali tratti terminali non costituisce ostacolo superabile all'installazione di GD sulle reti BT.

<sup>12</sup> Tale scelta, dato il livello di tensione delle reti BT, non influenza le analisi svolte.

elettrica di distribuzione durante il suo normale esercizio è cioè necessario individuare la curva di carico che rappresenta l'andamento della richiesta di potenza nel tempo.

Partendo dalle curve di carico determinate nello studio MT si è scelto di affinare i profili cumulati precedentemente utilizzati adottando un approccio legato alle fasce orarie (così come specificate nella Delibera 181/06 "Definizione delle fasce orarie per l'anno 2007 e successivi")<sup>13</sup> che mantiene una corrispondenza cronologica tra i diversi tipi di prelievo.

Definite le fasce secondo i criteri stabiliti dall'AEEG è possibile determinare le curve della potenza oraria del carico. In particolare, la curva per fasce riporta per ogni mese dell'anno tre giorni tipo, ciascuno dei quali è definito attraverso un diverso numero di punti:

- 3 punti nei giorni feriali (punto F1: h 8-19, punto F2 h 7-8 e 19-23; punto F3 h 23-7);
- 2 punti nei giorni semifestivi (punto F2 ore: 7-23 e punto F3 ore 23-7);
- 1 punto nei giorni festivi (punto F3 ore 1-24).

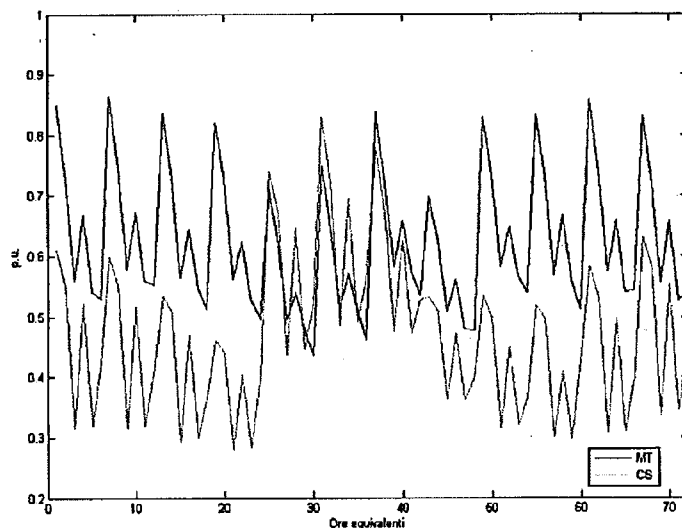


Figura 1. Curve a fasce per le utenze MT e le CS.

Ad ogni punto è associato un valore di potenza pari alla media dei valori appartenenti alla stessa fascia di ore per tutti i giorni omogenei del mese<sup>14</sup>. Ciò significa che ogni curva di variazione della potenza annua sarà composta da un numero di punti pari a 72 ("curva a fasce", Figura 1).

<sup>13</sup> La suddivisione in fasce orarie, oltre ad essere oggetto della citata Delibera, resta ad oggi ancora valida ed utilizzata non solo per la definizione delle tariffe biorarie ma anche per la determinazione del load profiling per i punti di prelievo in BT con potenza disponibile inferiore a 55 kW. Infatti, le fasce orarie nel servizio di vendita dell'energia elettrica per il mercato vincolato sono caratterizzate da un grado di omogeneità, in termini di valore atteso dell'energia elettrica all'ingrosso nelle ore in queste contenute, molto maggiore di quanto non sia richiesto per le strutture di prezzo previste nelle offerte al mercato libero.

<sup>14</sup> Ad esempio, il valore di potenza relativo al punto F1 feriale di Gennaio è calcolato come media delle potenze orarie registrate dalle 8.00 alle 19.00 di tutti i giorni feriali di Gennaio.

Definito il profilo di variazione dei carichi connessi alle reti di distribuzione<sup>15</sup>, si è proseguito con la determinazione dei loro valori energetici. Per determinare la potenza circolante sulla rete è infatti necessario attribuire a ciascun carico BT un coefficiente  $k$  pari al prodotto dei coefficienti di carico, utilizzo e contemporaneità (che scaleranno i valori contenuti nel database<sup>16</sup>). In fase preliminare si sono esplorati tre diversi scenari di carico (alto, medio e basso carico).

Nel presente studio si è scelto di effettuare tutte le analisi in riferimento al solo **scenario di carico medio**, ottenuto fissando il coefficiente di utilizzo dei carichi a 0,314 (stesso valore scelto per le CS nello studio MT), conseguendo un numero di ore equivalenti dei trasformatori di CS pari a 2350, simile al numero di ore equivalenti dei trasformatori AT/MT del campione MT (2400 h<sub>eqv</sub>).

### 3.3 Correlazione con le reti MT

Un ultimo aspetto da considerare è quello relativo al legame esistente tra ciascuna rete BT analizzata e la rete MT a cui risulta collegata. Infatti, per rendere più realistica l'analisi, tutte le simulazioni condotte sulle reti BT considerano anche la struttura della **rete MT a monte** e, quindi, il punto in cui la CS si collega. In particolare, il valore della tensione sulle sbarre MT del trasformatore di CS è determinato con un load flow effettuato sulla rete MT che contiene la CS estratta; in questo modo il valore imposto alle sbarre MT è quello corrispondente ai flussi di potenza sulla rete MT, ipotizzando di utilizzare per i carichi MT il profilo di variazione sopra determinato (curva blu in Figura 1). Questo valore è determinato per ciascuna analisi, ciò significa che ogni load flow effettuato sulla rete BT comporta un load flow sulla rete MT, necessario per definire il valore di tensione delle sbarre MT di CS. Nell'ambito dello studio condotto, per ciascuna rete analizzata, è stato individuato il valore del rapporto di trasformazione di CS tale da mantenere, all'evolversi delle condizioni di esercizio<sup>17</sup>, in tutti i nodi della rete BT la tensione all'interno dei limiti imposti dalla EN 50160. Applicando al campione in analisi questa metodologia di regolazione si ottiene che, in assenza di GD, il regime di tensione rientra, al cospetto di ogni possibile condizione di carico, nei vincoli contrattuali.

In definitiva, il database, completato come sopra detto, è stato impiegato per individuare possibili criticità legate alla presenza di Utenti attivi (Utenti i cui impianti prevedano la presenza di GD): tali analisi sono oggetto dei capitoli seguenti.

<sup>15</sup> Nel presente studio è utilizzata una stessa curva di variazione del carico per tutti gli Utenti BT che ha lo stesso andamento della curva di variazione delle CS (curva verde in Figura 1).

<sup>16</sup> Si ricorda che il database contiene la potenza disponibile per i carichi BT sottesi a ciascuna CS.

<sup>17</sup> Sia della rete BT che della rete MT a cui la CS risulta collegata, mantenendo la corrispondenza cronologica tra le due.

## 4 Analisi di Hosting Capacity nodale

Nel presente capitolo è valutato l'impatto dei limiti tecnici delle reti di distribuzione attuali sulla quantità di generazione installabile in un determinato nodo della rete.

Questa analisi, a differenza di quelle svolte successivamente, è **particolarizzata a livello nodale**: la potenza connettibile in accordo ai già citati vincoli tecnici è valutata, in tutti i nodi del campione di reti BT in esame, supponendo che non siano presenti, oltre a quello considerato, ulteriori impianti di generazione connessi alla rete di distribuzione (si assume cioè che la restante parte della rete sia puramente passiva).

I tre vincoli di natura tecnica, il cui rispetto risulta necessario per assicurare l'affidabilità, la qualità e la sicurezza del servizio di distribuzione dell'energia elettrica in BT, sono quelli già descritti nell'introduzione e meglio approfonditi nei paragrafi seguenti, in particolare, le **variazioni lente di tensione** (trattate al paragrafo 4.1), i **limiti relativi ai transiti** nelle linee e nel trasformatore (paragrafo 4.2) e le **variazioni rapide di tensione** (paragrafo 4.3).

### 4.1 Criticità legate alla regolazione di tensione

#### 4.1.1 Generalità

Ad oggi, la gestione dei profili di tensione lungo le linee, allorché vi siano connesse consistenti quantità di Generazione Diffusa, può rappresentare un aspetto critico per le reti di distribuzione in bassa tensione. Il presente studio mira a quantificare il livello di penetrazione di GD nelle reti oltre il quale le attuali logiche di regolazione (pensate per reti puramente passive) non siano più in grado di assicurare prestazioni adeguate, e debbano perciò essere riviste.

Il controllo dei profili di tensione implementato attualmente nelle reti BT è meno sofisticato di quello applicato alle reti di distribuzione in media tensione, in quanto basato unicamente sulla possibilità di regolare il rapporto di trasformazione del trasformatore MT/BT posto in Cabina Secondaria. Tale regolazione, a differenza di quella che ha luogo sulle reti MT, che è demandata al Variatore Sotto Carico (VSC) agente sul trasformatore di cabina primaria e quindi automatizzata<sup>18</sup>, deve essere svolta solo fuori linea, manualmente, da un operatore.

Impostato il rapporto di trasformazione del trasformatore MT/BT al valore desiderato, esso rimane costante, almeno fintanto che emerga la necessità (che potrebbe manifestarsi, per esempio, a seguito di sviluppi o riconfigurazioni della rete) di effettuarne un ulteriore aggiustamento. Valori

<sup>18</sup> Tale dispositivo può essere controllato secondo diverse logiche (a rapporto costante, a tensione sbarra MT costante, in regolazione di tensione con compound), inseguendo una condizione di esercizio in cui tutti i nodi della rete abbiano un'adeguata qualità dell'energia fornita (in termini di tensione al punto di consegna).

tipici a cui è possibile impostare tale rapporto spaziano tra il +2x2,5% e il -3x2,5% rispetto al rapporto di trasformazione nominale.

Emerge perciò un'importante differenza nelle strategie di regolazione delle reti BT rispetto a quanto accade per le reti MT: la tensione al secondario del trasformatore non è mantenuta a un valore costante, bensì è libera di variare in funzione dell'entità dei flussi di potenza che in un dato istante hanno luogo sulla rete di distribuzione. Inoltre, il valore a cui deve essere fissato il rapporto di trasformazione in CS deve essere tale da garantire il rispetto dei vincoli di tensione (superiore ed inferiore) sia in condizioni di massimo che di minimo carico, bilanciando le cadute di tensione sulle linee in modo da non avere infrazione dei limiti di tensione in tutti i nodi della rete e, in particolare, a fondo linea, nonché, in presenza di GD, in situazione di contro-flusso verso la rete MT.

In accordo a quanto indicato dalla EN 50160, la tensione di esercizio di ogni nodo della rete deve essere mantenuta entro un intervallo pari al  $\pm 10\%$  del valore nominale per il 95% del tempo<sup>19</sup>. Gli stessi requisiti sono specificati nei contratti di trasporto dell'energia elettrica, stipulati tra le imprese distributrici e gli utenti del trasporto (siano essi alimentati in MT o in BT), a conferma di quanto essi siano strettamente vincolanti nell'esercizio del sistema.

Le difficoltà nel mantenere la tensione di alimentazione all'interno di questo intervallo possono essere dovute, in assenza di GD, a due situazioni tra loro opposte:

- a carichi alti, l'elevato flusso di potenza (e quindi di corrente) che attraversa le dorsali determina in genere una forte caduta di tensione su di esse, facendo sì che la tensione di alimentazione a fondo linea sia inferiore alla nominale;
- a carichi bassi, invece, regolazioni particolari del rapporto di trasformazione MT/BT, combinate con valori elevati di tensione sul lato MT e con cadute di tensione molto modeste, potrebbero dare luogo a tensioni più elevate rispetto al livello consentito<sup>20</sup>.

Mentre nelle attuali reti di distribuzione (esercite in modo passivo), tra queste due condizioni quella che risulta particolarmente problematica è la prima, in scenari in cui vi siano elevate quantità di GD connessa alla rete, ad assumere un tono decisamente critico è la seconda, ossia la sopraelevazione del profilo di tensione che ha origine in presenza di contro-flusso (dato dalla GD) lungo una linea. L'incremento di tensione è tanto più marcato quanto maggiori sono le iniezioni di potenza da parte della GD (rispetto al carico) e quanto più quest'ultima è situata verso il fondo della linea.

<sup>19</sup> È poi ammesso che essa scenda fino al -15% per il restante 5% del tempo: tale possibilità non è peraltro considerata nello studio presente.

<sup>20</sup> Si ritiene in prima battuta trascurabile l'effetto delle capacità parassite.

L'incremento è associato alla perturbazione del profilo di tensione della rete, causata dagli Utenti attivi in condizioni di regime. L'insorgenza di tale fenomeno comporta, nella specificità di ogni singola linea, un livello massimo di generazione che è possibile connettere prima di incorrere nella necessità di una gestione *attiva* della linea medesima (e quindi dell'intera rete). Una volta superato tale livello, devono infatti essere indagate nuove modalità di conduzione della rete, ipotizzando ad esempio una regolazione di tensione da parte della GD, in prospettiva con l'impiego di sistemi di comunicazione e controllo in grado di trasferire opportuni segnali ai singoli generatori, così da coordinarli.

Nel presente studio l'analisi nodale della potenza installabile per variazioni lente di tensione è effettuata tramite un procedimento iterativo, basato sulla esecuzione di calcoli di load flow ripetuti sulla rete MT e sulla rete BT sottesa.

Per ogni nodo del campione è quindi valutata la quantità di generazione massima tale da non causare l'infrazione del limite superiore di tensione definito dalla norma EN 50160 (come già detto, il 110% della tensione nominale).

#### 4.1.2 Risultati

Lo studio è condotto, tramite calcoli di load flow, su tutti i nodi appartenenti al campione esaminato; i valori massimi di GD sono calcolati considerando la condizione di minimo e massimo carico di tutte le utenze connesse alle reti analizzate.

La Figura 2 riporta l'istogramma che associa, ad ogni intervallo di valori di potenza attiva, la percentuale dei nodi del campione caratterizzati da una GD installabile avente entità compresa nel suddetto intervallo, relativamente al vincolo esaminato.

È possibile osservare come il campione di reti considerato ammetta valori di potenza installabile in accordo alle variazioni lente di tensione piuttosto vari, che spaziano da 10 a oltre 300 kW. Da notare inoltre che quasi il 24% di nodi è in grado di accogliere valori di potenza superiori a 300 kW (limite di esplorazione) senza violare i vincoli sulle variazioni lente di tensione.

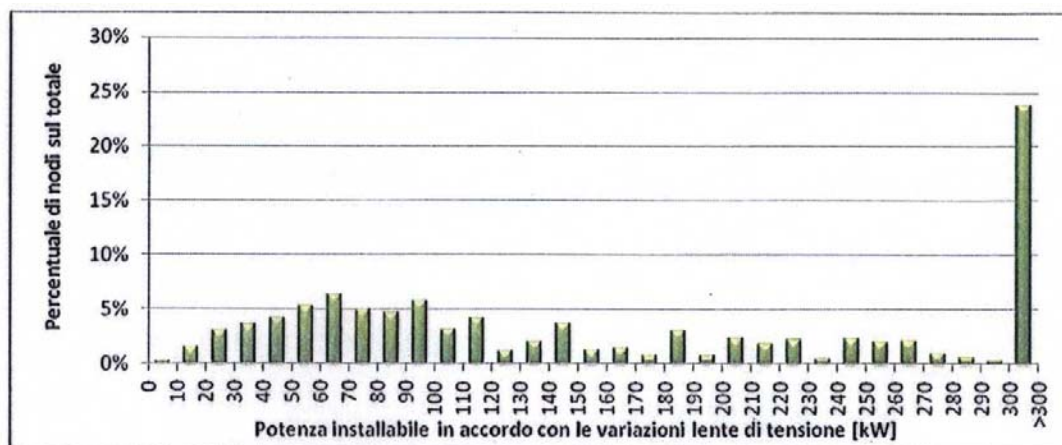


Figura 2. Potenza attiva installabile per variazioni lente di tensione, nei nodi del campione.

La Figura 3 mostra invece, per ciascun valore di potenza attiva, la percentuale dei nodi del campione nei quali è possibile connettere un impianto di generazione che eroghi la potenza riportata in ascissa, senza che la tensione di alimentazione superi il 110% del valore nominale.

Questo tipo di grafico permette facilmente di determinare la percentuale di nodi compatibile, secondo la normativa attuale<sup>21</sup>, con GD di entità pari a 30 e 100 kW: essa si attesta a valori piuttosto elevati, pari, rispettivamente, al 95% e al 60% della totalità del campione considerato. Per valori superiori di potenza, tale percentuale si riduce poi progressivamente, fino a giungere, in corrispondenza dei 300 kW, al già citato valore del 24%.

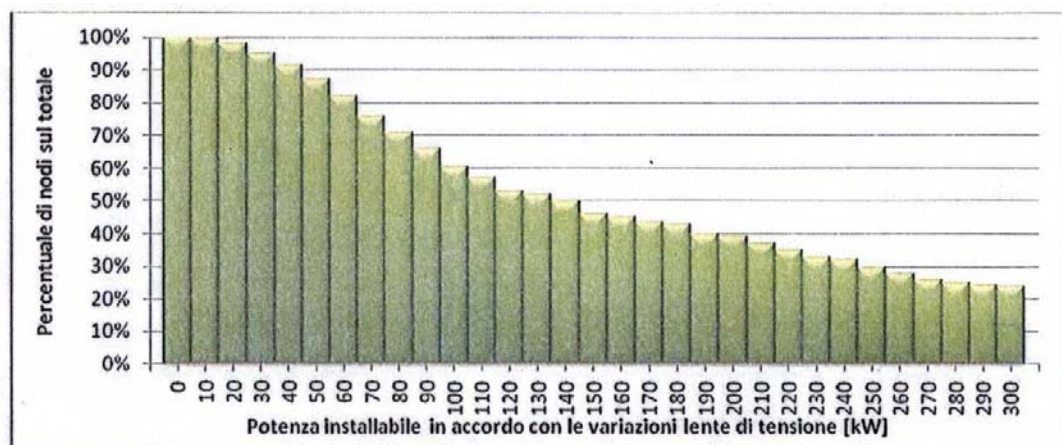


Figura 3. Curva cumulata delle potenze attive installabili per variazioni lente di tensione.

<sup>21</sup> Ci si riferisce al già citato Progetto CEI 1058.

## 4.2 Portate a regime e limiti di transito

### 4.2.1 Generalità

La potenza installabile in relazione ai limiti di transito su una linea è determinata come la quantità di generazione connettabile in un nodo della rete in accordo ai vincoli relativi alle sollecitazioni termiche nei conduttori e nel trasformatore<sup>22</sup>. Difatti, qualora le correnti eccedano le portate di tali componenti, ne causano un precoce degrado tale da comprometterne l'affidabilità.

In particolare, la massima corrente che può circolare in ciascun tratto di rete è valutata in funzione della sezione, della posa, e conseguentemente della portata, di ciascun conduttore, nonché delle soglie di regolazione delle protezioni termiche di Cabina Secondaria a cui le linee afferiscono.

La stima della generazione installabile in accordo ai limiti di transito è quindi effettuata, attraverso calcoli di load flow, installando in tutti i nodi della rete, uno alla volta, i generatori. Obiettivo della procedura è l'individuazione della massima GD installabile in ciascun nodo del campione tale da non causare, in contro-flusso, il superamento dei sopraccitati limiti in corrente.

Al fine di fornire risultati quanto più prossimi a quelli reali, è necessario adottare ipotesi opportune. In caso di installazione di generazione in nodi di rete alimentanti carichi di piccola potenza, le linee ad essi afferenti risultano tipicamente di sezione ridotta; ne deriva che, se si considerasse la portata di tali tratti di linea quale limite all'installabilità di GD in rete, la hosting capacity relativa ai transiti risulterebbe in molti casi assai limitata. Tale fatto sarebbe in contrasto con quanto accade nella realtà: in caso di connessione di un impianto di generazione a un nodo periferico della rete (ossia lungo una cosiddetta derivazione, caratterizzata solitamente da ridotte lunghezza e sezione), si procede alla sostituzione della linea medesima con una di portata adeguata.

Per le ragioni appena illustrate, durante la valutazione della hosting capacity inerente ai limiti di transito, le portate dei tratti di linea minori non sono considerate quali limiti alla possibilità di connettere GD in rete. In particolare, si assume che esse possano essere sostituite, a costi accettabili, con conduttori di sezione idonea<sup>23</sup>.

La stima della potenza installabile è effettuata con modalità simili a quelle applicate per le variazioni lente di tensione: per ogni nodo della rete viene valutato, attraverso calcoli di load flow, il valore di generazione che impegna completamente, in contro-flusso, la capacità di trasporto delle linee e/o del trasformatore di CS a monte.

<sup>22</sup> Il rispetto del vincolo di potenza trasferibile dal trasformatore è oggetto di ulteriori considerazioni nel capitolo 5.

<sup>23</sup> Al limite, di sezione pari a quella delle dorsali a cui esse afferiscono.

#### 4.2.2 Risultati

Lo studio effettuato sul campione di reti in esame evidenzia che la GD installabile in accordo ai limiti di transito assume valori generalmente elevati e pienamente compatibili con le disposizioni fornite dalla normativa vigente, in riferimento alla potenza degli impianti di GD da connettere, lungo linea, alle reti in bassa tensione.

La Figura 4 riporta i risultati relativi ai nodi del campione in forma percentuale. Essa evidenzia come, nella maggior parte dei casi, la quantità di generazione connettibile risulti compresa tra i 50 e i 200 kW, a cavallo quindi del valore di 100 kW, limite per la connessione dell'impianto di generazione in BT.

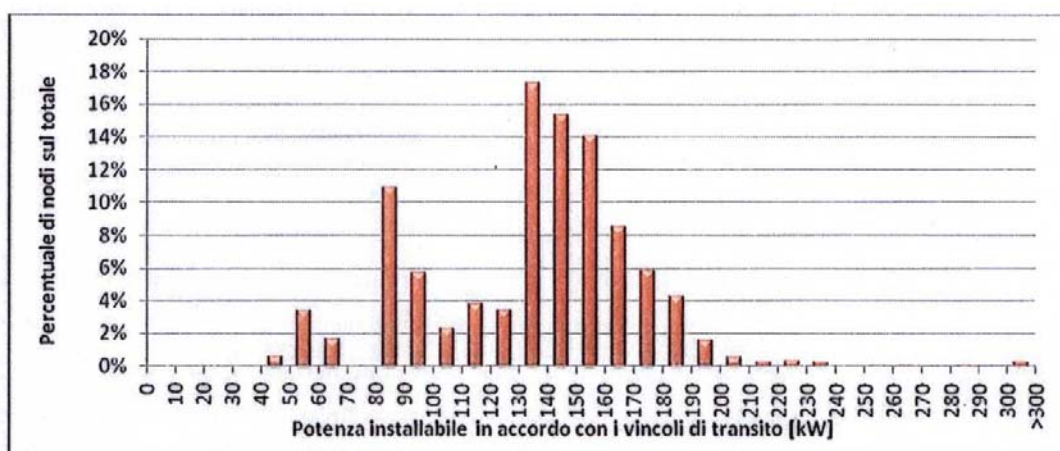


Figura 4. Percentuale di nodi che presentano potenza installabile per limiti di transito pari al valore indicato in ascissa.

La Figura 5 mostra più chiaramente quanto appena esposto: generatori di potenza pari a 100 kW sono installabili in una percentuale piuttosto elevata di nodi del campione (circa il 78%); impianti invece da 30 kW (taglia oltre la quale le norme prevedono la possibilità di realizzare apposite connessioni in antenna) sono connettibili lungo linea nella totalità dei nodi del campione.

Al di sopra dei 100 kW l'installabilità di GD in accordo ai limiti di transito decresce poi rapidamente all'aumentare della potenza considerata, quasi annullandosi nell'intorno dei 200 kW (solo l'1,7% dei nodi del campione ammette generatori di questa taglia).

Le cause di una distribuzione della potenza installabile come quella appena citata sono da ricercarsi, in prima analisi, nella portata dei conduttori che costituiscono le reti del campione analizzato e, in seconda istanza, nella taglia dei trasformatori MT/BT a cui esse afferiscono.

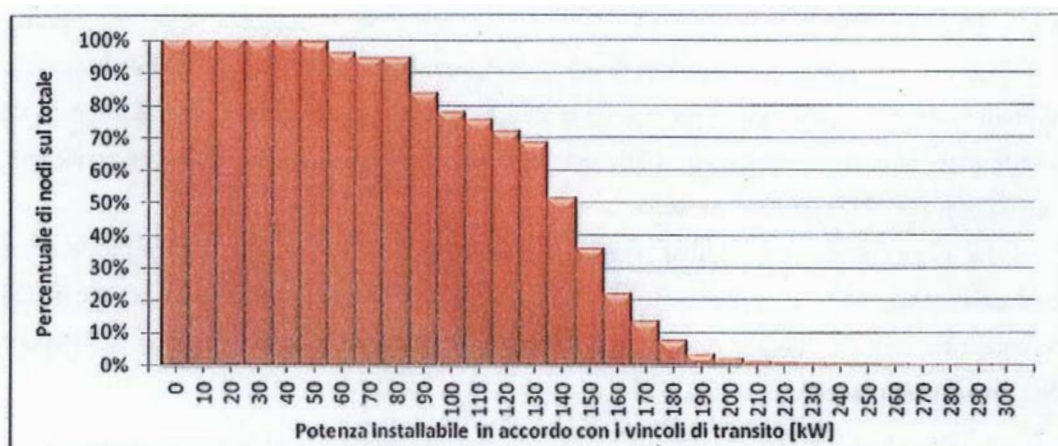


Figura 5. Diagramma cumulato della percentuale di nodi che presentano potenza installabile per limiti di transito pari al valore indicato in ascissa (considerando anche i limiti relativi al trasformatore di CS).

In particolare, le capacità di trasporto dei tronchi di linea del campione si attestano nell'intervallo dei 100÷250 A<sup>24</sup>. Ciò in conseguenza, oltre che della topologia delle reti considerate, anche dell'ipotesi assunta circa la possibilità di sostituire i conduttori delle derivazioni in caso di connessione alla rete di impianti di taglia elevata.

Tali valori di corrente corrispondono a una potenza trasmissibile in contro-flusso (e quindi a una hosting capacity), su di una rete in bassa tensione (380 V), qualora non siano presenti carichi passivi, pari a circa 65÷165 kW. I valori di potenza installabile nei nodi della rete sono quindi concentrati in tale intervallo. Nella realtà essi sono lievemente più elevati di quelli indicati, per via dell'incremento di hosting capacity determinato dai prelievi delle utenze passive in rete. Infatti, i transiti determinati da queste ultime riducono, a pari potenza immessa in rete dalla GD, l'entità del contro-flusso verso la rete di media tensione, permettendo di installare una quantità di generazione superiore prima di avere infrazione dei limiti di transito.

Si viene ora alla seconda causa che determina una limitazione della potenza installabile in rete in relazione ai transiti: il trasformatore. Esso in genere rappresenta un effettivo vincolo solo qualora sia di potenza nominale ridotta. Nel dettaglio, solo trasformatori da 50 kVA possono determinare criticità per la hosting capacity nodale; potenze più elevate, quali 100 kVA o superiori, sono invece sufficienti a sostenere i contro-flussi determinati da qualsiasi generatore connesso<sup>25</sup>, in accordo alle norme, in bassa tensione, considerato singolarmente.

<sup>24</sup> Corrispondenti alla regolazione della soglia termica impostata per delle protezioni a cui sono sottese dorsali di sezione compresa tra i 35 e 150 mm<sup>2</sup>.

<sup>25</sup> Come già detto, per potenze superiori a 100 kW la normativa attuale permette l'installazione della GD in media tensione. Benché il limite di transito sul trasformatore sia assunto pari al 90% della sua potenza nominale, e quindi pari, per un trasformatore da 100 kVA, a 90 kVA, si ritiene che i prelievi determinati dalle utenze passive siano in grado di compensare, in ogni assetto di carico (in particolare, al punto di minimo), il contro-flusso determinato dalla GD.

Qualora si considerassero unicamente i limiti di transito delle linee quale limite strutturale all'installabilità di GD in rete (si assume cioè che il Distributore sia disponibile a sostituire il trasformatore di CS, nel caso in cui questo rappresentasse un limite alla connessione di generazione in rete), i valori di hosting capacity che si otterrebbero sono riportati in Figura 6.

Si osserva come, a conferma del fatto che la portata del trasformatore MT/BT raramente rappresenta un limite alla hosting capacity nodale della rete, la quantità di generazione connettabile sia solo marginalmente superiore a quella illustrata precedentemente in Figura 5. La percentuale di nodi in grado di accogliere una potenza pari a 100 kW è infatti in questo caso del tutto confrontabile con quella del caso precedente (il miglioramento è nell'ordine dell'1÷2%). Per i valori di potenza soggetti agli incrementi più significativi non si supera comunque il 3% circa.

Ben visibile nel grafico, tra 60 e 80 kW, è la sovrastima della hosting capacity dovuta al non aver considerato il limite imposto dai trasformatori con potenza nominale di 50 kVA.

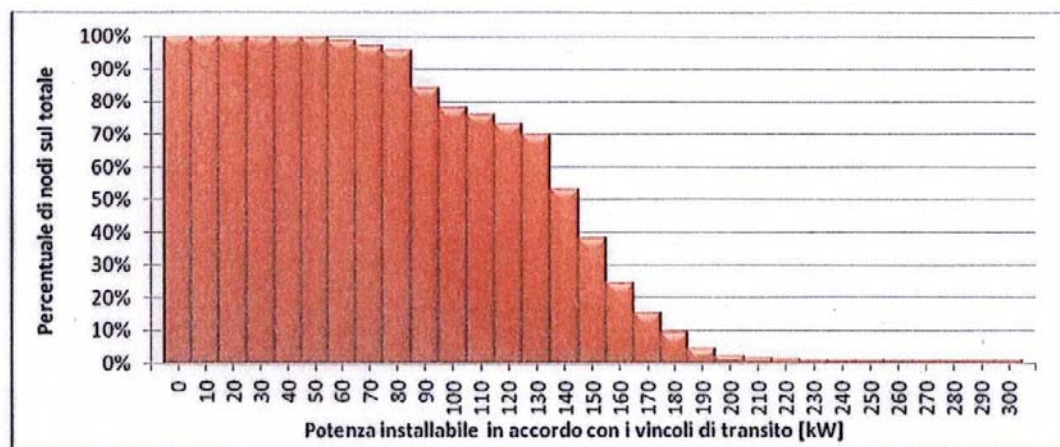


Figura 6. Diagramma cumulato della percentuale di nodi che presentano potenza installabile per limiti di transito pari al valore indicato in ascissa (non considerando i limiti relativi al trasformatore di CS).

La pratica conclusione che si trae da questa parte dello studio consiste nella necessità di sostituire trasformatori da 50 kVA con analoghi di taglia superiore in quelle limitate occorrenze di installazione di GD di taglia significativa, onde sfruttare appieno la capacità di trasporto di potenza delle reti BT sottese già dispiegate in campo.