

### 4.3 Variazioni rapide di tensione

#### 4.3.1 Generalità

Ai fini di questo studio, si definiscono variazioni rapide le perturbazioni del profilo di tensione della rete che hanno luogo in caso di repentina connessione o, con maggiore probabilità, disconnessione di un generatore dalla rete.

Relativamente a tale fenomeno la normativa attuale non pone un limite vincolante, ma si limita a darne indicazione fornendo un valore massimo orientativo pari al 5% del valore di tensione nominale<sup>26</sup>. È inoltre ammesso che “una variazione fino al 10% del valore nominale, con una durata breve, può aver luogo alcune volte al giorno in talune circostanze”.<sup>27</sup>

Il presente studio, relativo alla quantità di potenza installabile in rete in accordo alle variazioni rapide di tensione, si pone quindi l'obiettivo di determinare la massima generazione connettibile in un nodo della rete compatibilmente con le prescrizioni normative sopracitate. In particolare, la quantità di GD connettibile in rete sarà quella tale da non provocare, in caso di improvvisa connessione/disconnessione, una perturbazione della tensione nel nodo stesso superiore a un determinato valore limite. Data l'assenza, a riguardo, di indicazioni univoche, lo studio mira a verificare la hosting capacity della rete in relazione a entrambi i limiti forniti indicativamente dalla EN 50160; si valuta quindi la potenza installabile in riferimento sia al 5%, che al 10% della tensione nominale.

L'analisi è realizzata mediante successivi calcoli di load flow. In particolare, in ogni nodo della rete viene calcolato il valore di tensione che si avrebbe in due diverse situazioni: in presenza dell'immissione di potenza da parte della GD e in assenza di tale immissione di energia. La differenza tra le tensioni nel punto di connessione della GD così calcolate rappresenta, in prima approssimazione, l'entità della variazione rapida che si avrebbe a seguito della connessione o disconnessione del generatore dalla rete. La taglia massima di GD tale da non causare, in caso di connessione/disconnessione dalla rete, infrazione del limite prefissato (5 o 10% della tensione nominale) rappresenta la hosting capacity del nodo in questione.

<sup>26</sup> La norma europea EN 50160 “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems” recita in particolare: “For low voltage, under normal operating conditions, rapid voltage changes generally do not exceed 5% Un, but changes of up to 10% Un with a short duration might occur some times per day under some circumstances”.

<sup>27</sup> Normalmente il parallelo degli impianti di produzione alla rete tramite inverter, caso maggiormente diffuso in BT, non comporta problemi di variazioni rapide di tensione. Nel caso di generatori rotanti collegati alla rete senza interposizione di sistemi statici di conversione, gli interruttori di parallelo sono dotati di controllo di sincronismo (synchro-check), che attenua i transitori di tensione. Le variazioni rapide, di conseguenza, hanno luogo solo in caso di disconnessione repentina della GD dalla rete.

### 4.3.2 Risultati

Dall'analisi dei risultati riportati in Figura 7, relativi alla potenza installabile in rete in accordo con le variazioni rapide di tensione pari al 5% della tensione nominale, è osservabile che approssimativamente l'11% dei nodi del campione presenta una quantità di GD connettibile (compatibilmente con questo vincolo specifico) molto elevata (superiore a 300 kW). Tali nodi corrispondono, nel campione in analisi, ai nodi della rete posti in prossimità della Cabina Secondaria (aventi potenza di cortocircuito più elevata e quindi meno suscettibili a subire perturbazione di tensione). I nodi distribuiti lungo i vari feeder presentano invece dei limiti di potenza installabile ripartiti sull'intero arco di potenze tra 10 e 300 kW, con una maggiore densità per valori di GD compresi tra 10 e 150 kW.

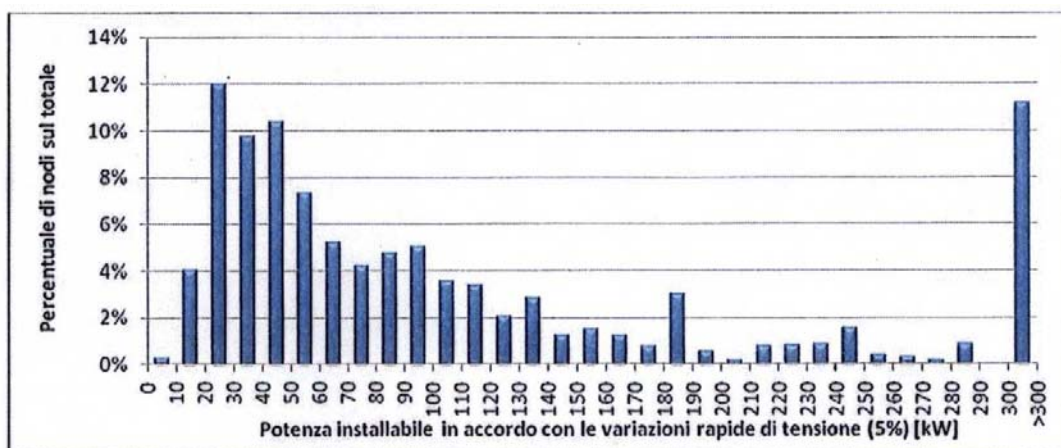


Figura 7. Percentuale di nodi che presentano potenza installabile per variazioni rapide di tensione (5%) pari al valore indicato in ascissa.

Per meglio quantificare la limitazione della potenza installabile al fine di contenere le variazioni rapide di tensione entro il 5%, si rappresenta in Figura 8 la curva cumulata dei risultati ottenuti. Essa mette in evidenza la progressiva riduzione della percentuale del numero di nodi del campione compatibili con l'installazione della generazione indicata in ascissa.

Dall'osservazione di questi risultati appare chiaramente come, qualora si assuma come limite il valore indicativo del 5% riportato nella EN 50160, il vincolo relativo alle variazioni rapide di tensione sarebbe il più limitante tra i vincoli tecnici (nodali) influenti sulla penetrazione di GD nelle reti di distribuzione attuali.

Infatti, la generazione che può essere connessa lungo linea (in accordo alle disposizioni delle norme attuali, ossia avente taglia uguale o inferiore a 30 kW) trova accoglimento in quasi l'84% dei

nodi del campione. Tale percentuale scende drasticamente qualora si consideri una potenza pari a 100 kW, tollerabile solo nel 37% dei nodi simulati.

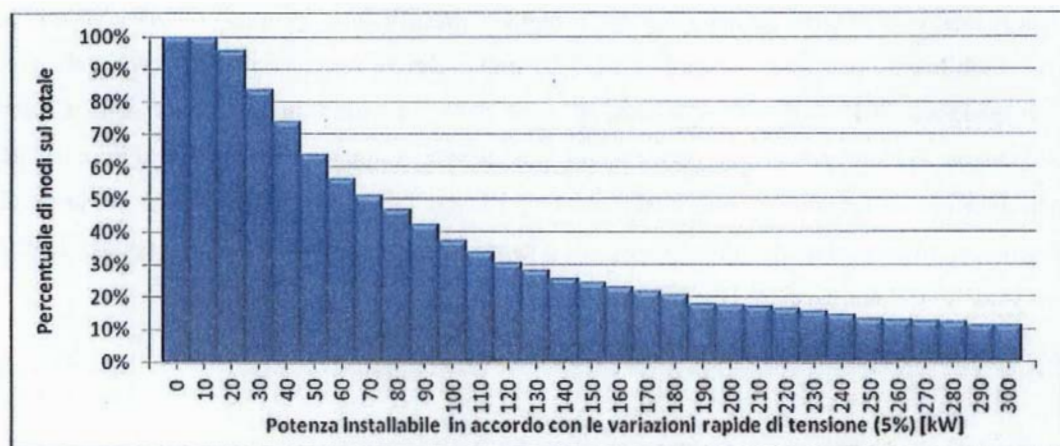


Figura 8. Diagramma cumulato della percentuale di nodi che presentano potenza installabile per variazioni rapide di tensione (5%) pari al valore indicato in ascissa.

Analizzando la hosting capacity che si ottiene assumendo come limite per le variazioni rapide il 10% della tensione nominale, si ha la situazione riportata in Figura 9.

È possibile osservare come, rispetto al caso precedente, l'installabilità di generazione in rete aumenti significativamente: più del 25% dei nodi del campione ammette la connessione di potenze superiori ai 300 kW.

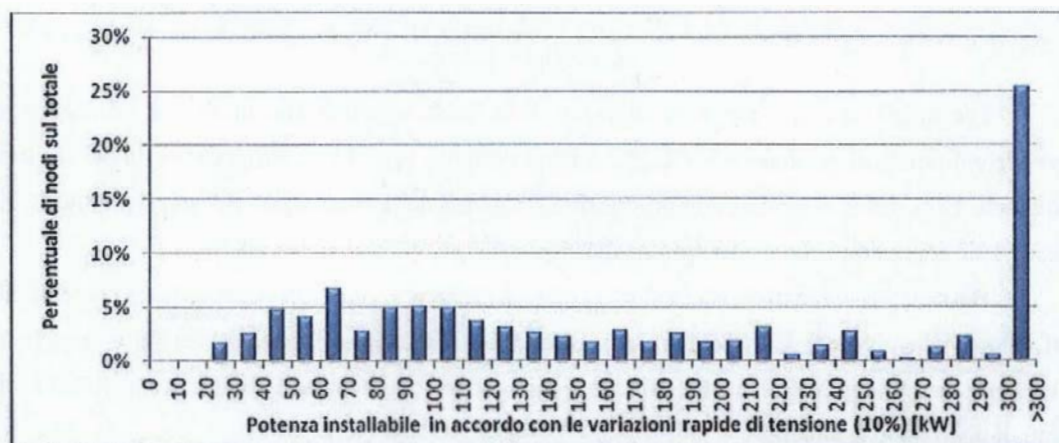


Figura 9. Percentuale di nodi che presentano potenza installabile per variazioni rapide di tensione (10%) pari al valore indicato in ascissa.

L'incremento di installabilità di GD è ancor più evidente osservando la Figura 10: con il nuovo limite del 10% della tensione nominale, la percentuale di nodi in grado di accogliere 30 kW di generazione passa dall'84 al 98%, inoltre, il numero di nodi a cui è possibile connettere 100 kW di GD si mantiene comunque elevato (circa il 67%) e nettamente superiore a quello determinato ponendo un limite per le variazioni rapide pari al 5% della tensione nominale (circa il 37%).

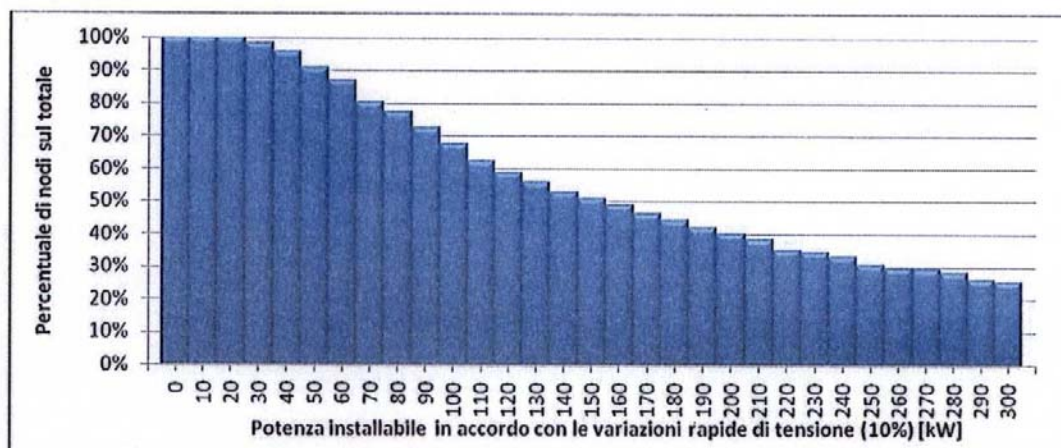


Figura 10 Diagramma cumulato della percentuale di nodi che presentano potenza installabile per variazioni rapide di tensione (10%) pari al valore indicato in ascissa.

## 5 Analisi di linea e di rete

Dopo aver discusso, nel precedente capitolo, l'effetto dei tre vincoli tecnici nodali sulla quantità di GD da installare in ogni nodo della rete, in questa seconda fase dello studio sono condotte analisi a livello aggregato, di linea (che comprende più nodi) e di rete BT (che comprende più linee), per individuare i valori complessivi di potenza da GD installabile (rispettivamente lungo ciascuna linea e nell'ambito di ciascuna rete) in relazione agli effetti dell'incremento della corrente di cortocircuito sulla tenuta elettromeccanica dei componenti esistenti e sul corretto funzionamento delle protezioni di rete.

Nella prima parte del capitolo, si affronta il problema della **tenuta elettromeccanica dei componenti**: il limite alla possibilità di installare GD è associabile a ciascuna rete, e viene raggiunto allorché la complessiva GD installata porta la corrente di cortocircuito (fornita in maniera prevalente dalla rete a monte, in maniera minore dalla GD stessa) a superare i limiti di tenuta elettromeccanica dei componenti.

Nella seconda parte si valuta come la GD possa introdurre **criticità nelle protezioni di linea** (poste in CS), con riferimento alle condizioni di normale esercizio (portata delle condutture) e alle situazioni di guasto<sup>28</sup> (in particolare di guasto polifase<sup>29</sup>).

Questi due vincoli costituiscono un reale limite alla installazione di GD sulle reti di distribuzione: infatti, la connessione di un nuovo impianto di produzione alla rete elettrica deve essere preceduta sia dalla valutazione della corrente di cortocircuito complessivamente risultante, al fine di verificare il rispetto delle caratteristiche elettromeccaniche degli organi di manovra esistenti<sup>30</sup>, sia dalla verifica che il contributo di corrente sulle linee elettriche fornito dalla GD non sia tale da provocare l'intervento intempestivo delle protezioni poste sulle partenze delle medesime linee. In caso di esito negativo, occorre adottare accorgimenti impiantistici che consentano il rispetto delle condizioni di corretto funzionamento della rete (per esempio, potrebbe essere necessario adeguare i dispositivi di rete, oppure utilizzare un diverso punto di connessione alla rete, oppure ancora interporre reattanze di limitazione tra l'impianto di produzione e la rete al fine di ridurre il contributo del predetto impianto alla corrente di cortocircuito complessiva<sup>31</sup>).

<sup>28</sup> La verifica che le correnti dovute all'immissione di potenza da parte della GD, in normale funzionamento di rete, non superino la soglia di intervento delle protezioni da sovracorrente è stata effettuata, a livello nodale, nel precedente capitolo 4.

<sup>29</sup> Nel seguito dello studio, ci si riferisce a un guasto trifase franco, evento che (nelle reti in esame) mette in gioco le sovracorrenti di maggiore entità. Si ricorda peraltro che non sono previste protezioni dedicate alla selezione dei guasti a terra sulla rete BT.

<sup>30</sup> Tale valutazione risulta maggiormente rilevante nel caso di GD connessa alla rete senza interposizione di convertitori statici, che però sulle reti in esame risulta la condizione meno probabile.

<sup>31</sup> Quest'ultimo provvedimento è da riferirsi essenzialmente alle eventuali macchine rotanti connesse alla rete senza interposizione di sistemi di conversione.

## 5.1 Correnti di cortocircuito e tenuta elettromeccanica dei componenti

### 5.1.1 Generalità

Nel campione in analisi, la potenza di cortocircuito può assumere valori molto diversi in funzione del punto della rete in cui essa è calcolata: da valori maggiori alle sbarre BT fino a valori più bassi per i tratti terminali delle linee. Considerazioni quantitative possono essere svolte premettendo alcune informazioni circa le taglie e le tipologie tipiche dei trasformatori che alimentano le sbarre BT (50 – 100 – 160 – 250 – 400 – 630 kVA).

Questi trasformatori portano a correnti di cortocircuito che sono perlopiù contenute entro la decina di kA<sup>32</sup>. A questo valore di corrente di cortocircuito corrisponde un predeterminato livello di tenuta elettromeccanica, che è una caratteristica peculiare delle infrastrutture, ovvero della rete e delle apparecchiature connesse alla rete medesima. Il progetto CEI 1058 ha standardizzato i livelli di tenuta elettromeccanica dei componenti degli impianti di utenza. Infatti, considerando una corrente di cortocircuito trifase ai morsetti BT di Cabina Secondaria non superiore al valore pianificato di 16 kA, si assume per le apparecchiature dell'Utente un valore convenzionale della corrente di cortocircuito massima pari a:

- 10 kA per le forniture trifase per Utenti con potenza disponibile fino a 30 kW<sup>33</sup>.
- 6 kA per le forniture monofase.

Nella pratica le situazioni più critiche si hanno quando la taglia del trasformatore MT/BT installato in CS è maggiore o uguale a 400 kVA e l'impianto Utente è collocato in prossimità delle sbarre di Cabina Secondaria. In ogni caso, si assume convenzionalmente che l'impedenza della dorsale tra la CS e il nodo Utente, nonché del collegamento tra la dorsale e il nodo Utente<sup>34</sup>, rendano la corrente di cortocircuito inferiore a 10 kA, in linea con le indicazioni della CEI 1058.

Per questo studio si ipotizza di considerare la GD collegata direttamente alle sbarre di CS<sup>35</sup> e di utilizzare una tenuta al cortocircuito pari a 10 kA per le apparecchiature di CS alimentate da un trasformatore con potenza nominale fino a 250 kVA e pari a 16 kA nel caso di trasformatore da 400 o 630 kVA<sup>36</sup>.

<sup>32</sup> Le reti dei contesti urbani possono presentare correnti di cortocircuito maggiori cui corrispondono taglie maggiori delle macchine (fino a 400 ÷ 630 kVA).

<sup>33</sup> I valori indicati tengono conto della presenza dei cavi di collegamento tra la sbarra BT della CS e l'impianto utente. Per forniture con potenza disponibile sopra i 30 kW, possono essere comunicati dal Distributore valori superiori a 15 kA.

<sup>34</sup> Unitamente alla limitazione di corrente dell'interruttore automatico posto a inizio linea.

<sup>35</sup> Tale assunzione non corrisponde sempre alla pratica riscontrabile nelle reti esercizio, ma una simile ipotesi fornisce indicazioni generali e svincolate dalla topologia di rete.

<sup>36</sup> Come già detto, anche nel caso di trasformatori con potenze da 400 o 630 kVA, a livello convenzionale, all'interruttore utente è richiesto un potere di cortocircuito di 10 kA, per effetto delle impedenze interposte.

Questi livelli di tenuta elettromeccanica sono considerati come un vincolo strutturale delle reti di bassa tensione in Italia. In altre parole, è al di fuori di questo studio la possibilità di provvedere a una sostituzione sistematica di tutte le apparecchiature<sup>37</sup>, al fine di incrementare il potere di apertura degli apparecchi di manovra, e installare quindi crescenti capacità di Generazione Diffusa.

Poiché, come detto, la presenza di impianti di produzione connessi alla rete BT determina un innalzamento delle correnti di cortocircuito (rispetto al caso di rete puramente passiva), il limite alla potenza connettibile alle reti risulta dato dal margine esistente tra i livelli attuali di cortocircuito sulle reti e il livello di tenuta elettromeccanica precedentemente citato.

In generale, nei casi reali, la massima potenza di generazione che è possibile connettere è maggiore per quei nodi della rete distanti dalla Cabina Secondaria e, soprattutto, in caso di connessione su linee aeree (date le sezioni e le configurazioni di posa impiegate, le linee in cavo hanno un'impedenza più bassa delle linee aeree).

La situazione più critica (assunta per le analisi qui condotte) si ha invece nel caso di connessione di impianti di produzione **direttamente alla sbarra BT di CS.**

### 5.1.2 Risultati

L'analisi effettuata intende individuare la potenza installabile in rete al fine di evitare il superamento della tenuta elettromeccanica dei componenti di rete (interruttori di CS), considerata pari a 10 kA per i trasformatori da 50, 100, 160 e 250 kVA e a 16 kA per quelli da 400 e 630 kVA. La tensione nominale della rete è considerata pari a 380 V, che rappresenta l'attuale livello di tensione nominale per la distribuzione BT trifase<sup>38</sup>. I calcoli di cortocircuito sono effettuati secondo la norma CEI 11-25 che prevede, oltre ad altre ipotesi semplificative, di utilizzare per i calcoli una tensione pari a  $1,1 V_n$ .

Le tensioni di cortocircuito dei trasformatori di Cabina Secondaria si considerano pari al 4%, per trasformatori da 50, 100, 160, 250 e 400 kVA, e al 6%, per trasformatori da 630 kVA, della tensione nominale (parametri standard ricavati dalla norma CEI-UNEL 21010 che ha unificato le caratteristiche dimensionali di trasformatori trifase a raffreddamento naturale in olio).

<sup>37</sup> Sostituzione che dovrebbe interessare sia le infrastrutture del Distributore sia quelle degli Utenti connessi.

<sup>38</sup> A differenza dei rimanenti sistemi europei, dove si riscontra una tensione nominale di 230 V per le forniture monofase e di 400 V per le forniture trifase, il livello di tensione nominale per la BT in Italia, in virtù della legge n. 105 dell'8 marzo 1949, è fissato in 220 V per le forniture monofase e di 380 V per le forniture trifase.

Come premesso, si assume infine, per semplicità e a favore della sicurezza, che l'apporto alla corrente di cortocircuito da parte della GD sia applicato direttamente alle sbarre di CS, così da poterne quantificare immediatamente il valore<sup>39</sup>.

Adottando tali ipotesi è possibile determinare le correnti di cortocircuito, nonché il margine disponibile rispetto al limite massimo di 10 o 16 kA, come indicato in Tabella 2.

$A_n$ [kVA]	$V_{cc}$ [%]	$V_n$ [V]	$I_{cc}$ [kA]	$I_{cu}$ [kA]	Margine $I_{cc\_GD}$ [kA]
50	4	380	2,036	10	7,964
100	4	380	3,972	10	6,028
160	4	380	6,172	10	3,828
250	4	380	9,245	10	0,755
400	4	380	13,838	16	2,162
630	6	380	14,406	16	1,594

Tabella 2. Valutazione del margine di corrente di cortocircuito disponibile per la GD al fine di non superare la tenuta in cortocircuito dei componenti in rete.

dove:

- $A_n$  è la potenza nominale del trasformatore di Cabina Secondaria MT/BT [kVA];
- $V_{cc}$  è la tensione di cortocircuito del trasformatore MT/BT in p.u. rispetto alla nominale;
- $V_n$  è la tensione nominale del trasformatore [V];
- $I_{cc}$  è la corrente di cortocircuito alle sbarre BT del trasformatore dovuta al contributo della rete [kA];
- $I_{cu}$  è la tenuta dei componenti [kA];
- Margine  $I_{cc\_GD}$  è la differenza tra la tenuta dei componenti e la corrente di cortocircuito determinata dalla rete BT. Rappresenta la quantità di corrente di cortocircuito che può fornire la generazione installata in rete [kA].

Il contributo della rete alle correnti di cortocircuito è riportato nella colonna  $I_{cc}$  della Tabella 2, la GD può dunque fornire, senza causare un superamento della tenuta dei componenti, una corrente pari a:

$$\text{Margine } I_{cc\_GD} = I_{cu} - I_{cc}$$

<sup>39</sup> Si ipotizza, inoltre, di utilizzare per l'impedenza della rete a monte un valore convenzionale pari a 0,003 Ω.

Per verificare la reale incidenza del vincolo appena determinato, si ritiene opportuno considerare, congiuntamente a tale margine, anche il vincolo indotto sulla GD dal massimo livello di utilizzo possibile per il trasformatore, già calcolato rete per rete nel precedente capitolo.

Poiché la stragrande maggioranza degli impianti di GD in BT (principalmente fotovoltaici)<sup>40</sup> risulta connessa alla rete tramite convertitori statici di piccola potenza, caratterizzati da correnti di cortocircuito prossime alla loro corrente nominale, si adotta, cautelativamente, un fattore 1,2 fra la corrente nominale e quella fornita in cortocircuito; con tale assunzione, la quantità di GD installabile risulta dalla colonna *Margine  $A_n$* , della successiva Tabella 3:

<i>A<sub>n</sub></i> [kVA]	<i>Margine I<sub>n</sub></i> [kA]	<i>Margine A<sub>n</sub></i> [kVA]	<i>GD al limite termico del trasformatore</i> [kVA]	<i>Vincolo più critico</i>
50	6,636	4367	52,5	<i>Limite termico trasf.</i>
100	5,023	3306	105	<i>Limite termico trasf.</i>
160	3,190	2099	168	<i>Limite termico trasf.</i>
250	0,629	414	262,5	<i>Limite termico trasf.</i>
400	1,802	1185	420	<i>Limite termico trasf.</i>
630	1,328	874	661,5	<i>Limite termico trasf.</i>

Tabella 3. Valutazione della totale GD installabile senza superare la tenuta in cortocircuito dei componenti in rete, nell'assunzione di GD connessa tramite convertitori statici.

dove ciascuna colonna ha il significato di seguito spiegato.

- *A<sub>n</sub>* è la potenza nominale del trasformatore [kVA].
- *Margine I<sub>n</sub>* è la quantità di corrente erogabile dalla generazione assumendo un fattore 1,2 fra la corrente nominale e quella fornita in cortocircuito, riportata nella colonna *Margine I<sub>cc\_GD</sub>* di Tabella 2. È quindi possibile installare una quantità di generazione avente tale corrente nominale [kA].
- *Margine A<sub>n</sub>* è la quantità di generazione installabile al fine di non superare la tenuta dei componenti [kVA]<sup>41</sup>.
- *Limite termico del trasformatore* è la quantità limite di GD installabile al fine di non determinare un'inversione di flusso verso la rete MT superiore al 90% della potenza

<sup>40</sup> Alla luce dei sistemi di incentivazione vigente, è ipotizzabile perlopiù l'installazione di generatori connessi alle reti per mezzo di convertitori statici.

<sup>41</sup> Le limitazioni alla GD installabile in rete vengono espresse in kVA in ragione della loro dipendenza dalla potenza di cortocircuito nodale, dalla taglia dei trasformatori e dei convertitori statici, parametri riferiti alla potenza apparente. Tale indicazione è da considerarsi come eccezione rispetto agli altri vincoli tecnici, quantificati in termini di potenza attiva massima della GD. In ragione delle regole di connessione oggi in vigore, CEI 11-20, la distinzione fra le due classi di vincoli è puramente formale, essendo la generazione su reti a tensione minore vincolata alla produzione di sola potenza attiva.

nominale del trasformatore MT/BT<sup>42</sup>. Si suppone che le utenze assorbano una quantità massima di potenza pari al 15%<sup>43</sup> della nominale del trasformatore (minimo carico) cosicché la potenza erogabile dalla GD sia il 105% della potenza nominale del trasformatore [kVA].

- *Vincolo più critico* è il valore minore tra il limite relativo all'inversione di flusso ed il limite relativo alle correnti di cortocircuito.

Dai risultati riportati in Tabella 3 emerge come in tutti i casi la quantità massima di generazione installabile in rete è superiore al limite di GD relativo al vincolo termico del trasformatore (che risulta quindi l'elemento più limitante): la quantità di potenza connettabile in rete si attesta sempre a valori superiori a 50 kVA (maggiori di 400 kVA se si considera come unico vincolo la tenuta elettromeccanica dei componenti).

Qualora si ripetessero le stesse analisi con riferimento a generatori rotanti connessi senza il tramite di convertitori statici<sup>44</sup>, si otterrebbero risultati analoghi tranne che per trasformatori di CS di taglia elevata (630 kVA), per i quali la quantità massima di generazione installabile in rete risulterebbe inferiore al limite di GD relativo al vincolo termico del trasformatore.

In definitiva, per le taglie di trasformatore fino a 400 kVA, a prescindere dalla presenza o meno di convertitori statici tra GD e rete, l'incremento della corrente di cortocircuito dovuto alla GD non costituisce un reale vincolo. Di conseguenza, un'indicazione prospettica che si trae da questa parte dello studio consiste nella necessità di contenere la taglia dei trasformatori da impiegare sull'interfaccia MT/BT (o di impiegare macchine con impedenze di cortocircuito opportunamente aumentate), ovvero di imporre un requisito di maggiore tenuta elettromeccanica dei componenti, onde evitare di imbattersi, in futuro, nelle relative limitazioni.

<sup>42</sup> Per i trasformatori MT/BT non è prevista nessuna ridondanza in CS, ciò significa che il grado di utilizzo di ciascun trasformatore può essere molto alto, ad esempio pari al 90% della sua potenza nominale; più alto quindi rispetto a quello dei trasformatori di CP, ipotizzato tra il 50-60%, per tenere in conto la ridondanza funzionale, che in BT non è garantita.

<sup>43</sup> Tale valore è trovato come media tra i valori di carico minimo di ciascuna delle reti BT analizzate in ognuno dei tre diversi scenari.

<sup>44</sup> Probabilità scarsamente verificabile sulle reti BT.

## 5.2 Correnti di cortocircuito date dalla GD e protezioni di linea

Per quanto riguarda le protezioni di rete, la presenza della GD può introdurre delle criticità, sia con riferimento alle normali situazioni di regime, sia con riferimento alle situazioni di guasto.

Nel normale funzionamento della rete, le correnti dovute all'immissione di potenza da parte della GD non devono superare la soglia di intervento delle protezioni da sovracorrente (in particolare, da sovraccarico); tale soglia di intervento (regolazione) è direttamente correlata con la portata dei conduttori, che fissa un limite all'utilizzo dei conduttori medesimi, oltre il quale essi sarebbero sottoposti a sollecitazioni termiche tali da causarne un precoce invecchiamento.

In caso di guasto (in particolare di guasto polifase<sup>45</sup>) è invece necessario tenere conto delle soglie di cortocircuito delle protezioni medesime, poste a inizio linea, in CS.

### 5.2.1 Protezioni delle linee BT di distribuzione

La modalità di gestione e le strategie di protezione delle reti BT sono assai semplici: ciascuna linea è equipaggiata con una protezione finalizzata all'eliminazione, più rapida possibile, del cortocircuito che si dovesse verificare sulla linea medesima.

Nel presente studio si tratta per semplicità il caso di linee protette con interruttori magnetotermici<sup>46</sup>; considerazioni analoghe valgono nel caso di linee dorsali protette con fusibili; viceversa, l'eventuale presenza di fusibili di taglia ridotta sulle derivazioni potrebbe costituire una complicazione per l'installazione di GD.

Come già detto per le reti MT, anche sulle reti BT un elevato livello di penetrazione della GD potrebbe comportare la necessità di una eventuale revisione, o adeguamento, del sistema di protezione e delle relative regolazioni utilizzate nelle Cabine Secondarie: tali apparati non sono infatti in grado di distinguere il verso della corrente rilevata.

### 5.2.2 Protezioni da cortocircuito e limiti associati

In analogia con quanto dettagliato nel paragrafo 5.2.1, inerente alle limitazioni dovute all'incremento delle correnti di cortocircuito in presenza di GD sull'intera rete, vi è un secondo effetto da considerare, legato alla protezione di massima corrente installata in CS, in corrispondenza della partenza di ogni singola linea. L'intervento selettivo di tale protezione sarà evidentemente influenzato dalla sola GD sottesa alla linea suddetta.

<sup>45</sup> Come già detto, ci si riferisce a un guasto trifase franco, evento che (nelle reti in esame) mette in gioco le sovracorrenti di maggiore entità.

<sup>46</sup> A seconda dei casi, è possibile riscontrare protezioni magnetotermiche dirette ovvero relè di protezione a più soglie atti a realizzare le medesime funzioni (protezione delle linee da sovraccarico e da cortocircuito).

La protezione contro i cortocircuiti prevede una soglia istantanea, identificabile per semplicità in cinque volte la corrente nominale della protezione stessa (protezione da sovraccarico). Nel presente studio, partendo dalle sezioni standard dei collegamenti BT e ipotizzando<sup>47</sup> per ognuna un valore massimo di corrente ammissibile in regime permanente (portata  $I_t$ )<sup>48</sup>, si ricava il corrispondente valore nominale delle protezioni da sovracorrente ( $I_n$ ) e da cortocircuito ( $I_p$ ) installate a inizio linea, come da Tabella 4.

Sezione [mm <sup>2</sup> ]	$I_t$ [A]	$I_n$ [A]	$I_p$ [A]
16	75	63	315
25	95	80	400
35	120	100	500
50	145	125	625
70	180	160	800
95	200	200	1000
150	250	250	1250
240	325	300	1500

Tabella 4. Regolazione delle protezioni in CS.

In caso di cortocircuito su una linea (per es., linea A), la presenza di GD lungo un'altra linea sottesa alla stessa CS (per es., linea B), fornendo un eccessivo contributo alla corrente di guasto che interessa (da valle) l'interruttore automatico a protezione della linea B stessa, potrebbe provocare l'intervento intempestivo del medesimo interruttore automatico<sup>49</sup>.

L'identificazione della GD installabile su ogni singola linea, al fine di non causare scatti intempestivi dovuti alle protezioni da cortocircuito, può essere condotta adottando le medesime ipotesi già introdotte nel paragrafo 5.1.

Ne consegue un legame diretto fra la GD installata sulla linea e il valore massimo della corrente di guasto trifase, valore che, in ragione delle protezioni di massima corrente, deve essere inferiore ai dati riportati in Tabella 4 (colonna  $I_p$ ).

<sup>47</sup> In linea con le normali prassi di esercizio dei Distributori.

<sup>48</sup> Non si è considerata l'effettiva portata dei conduttori: tale parametro, funzione della sezione, del tipo d'isolamento e della posa, risulta di volta in volta diverso, e pertanto di difficile determinazione. Per i tratti laterali (che si diramano dalla dorsale) la portata potrebbe essere inferiore, ma per semplicità la si assume comunque uguale a quella della dorsale; infatti, nei casi di installazione di generatori di taglia rilevante su rami di rete alimentanti carichi di piccola potenza (e quindi potenzialmente di sezione ridotta), si suppone che tali tratti di linea abbiano una lunghezza limitata, così da renderne praticabile la sostituzione.

<sup>49</sup> La linea su cui è presente la GD (linea B) sarebbe quindi disalimentata per effetto di un guasto su una linea diversa attestata alla stessa sbarra di CS (linea A).

### 5.2.3 Risultati

A partire dalle ipotesi precedentemente introdotte, si giunge agli esiti numerici delle tabelle di seguito riportate:

$V_n [V]$	$I_p [A]$	$I_n [A]$	$A_n [kVA]$
380	315	263	173
380	400	333	219
380	500	417	274
380	625	521	343
380	800	667	439
380	1000	833	548
380	1250	1042	686
380	1500	1250	823

Tabella 5. Valutazione della GD installabile su ogni singola linea in ragione dei vincoli dati dalle protezioni dal cortocircuito.

dove ciascuna colonna ha il significato di seguito spiegato.

- $V_n$  è la tensione nominale della linea in analisi  $[V]$ .
- $I_p$  è la regolazione della protezione di massima corrente installata in CS sulla partenza di ogni linea  $[A]$ .
- $I_n$  è la corrente nominale della GD connettabile alla rete nell'ipotesi di macchine dotate di inverter  $[A]$ .
- $A_n$  è la potenza nominale della GD connettabile alla linea  $[kVA]$ , così come ottenuta a partire dalla corrente nominale  $I_n$ , nell'ipotesi di macchine dotate di inverter.

Per avere un'idea della reale incidenza di tali valori, è opportuno (come fatto in precedenza per i limiti relativi al cortocircuito) un confronto con le limitazioni alla quantità di GD connettabile alla singola linea, in accordo con i vincoli di transito. A tal fine la condizione di lavoro limite raggiungibile corrisponde a quella in cui la GD soddisfa tutto il carico locale (della linea) ed inietta sulla sbarra BT di CS la propria corrente massima di regime.

Assumendo per semplicità che il carico connesso alla linea (prima dell'installazione della GD) sia nullo<sup>50</sup> si trae la seguente tabella:

$V_n [V]$	$I_n [A]$	$A_n [kVA]$
380	63	41
380	80	53
380	100	66
380	125	82
380	160	105
380	200	132
380	250	165
380	300	197

Tabella 6. Valutazione della GD connettibile a ogni singola linea in ragione i vincoli relativi alle protezioni da sovracorrente (sovraccarico).

dove ciascuna colonna ha il significato di seguito spiegato.

- $V_n$  è la tensione nominale della linea in analisi  $[V]$ .
- $I_n$  è la regolazione della protezione di massima corrente di regime installata in CS sulla partenza di ogni linea  $[A]$ .
- $A_n$  è la massima quantità di GD connettibile alla rete in ottemperanza alle soglie di sovraccarico  $[kVA]$ .

Confrontando le varie casistiche si ottiene la Tabella 7, in cui appare chiaramente come il vincolo di massima corrente di regime sia più stringente<sup>51</sup> del vincolo indotto dalle soglie di cortocircuito: i valori di potenza installabile sulla linea risultano sempre superiori a 40 kW<sup>52</sup>.

Sezione $[mm^2]$	Vincolo di max I di regime $[kVA]$	Vincolo di max I di guasto (conv. statici) $[kVA]$	Vincolo più critico
16	41	173	Max I di regime
25	53	219	Max I di regime
35	66	274	Max I di regime
50	82	343	Max I di regime
70	105	439	Max I di regime
95	132	548	Max I di regime
150	165	686	Max I di regime
240	197	823	Max I di regime

Tabella 7. Valutazione comparativa della totale GD installabile su ogni singola linea rispetto ai vincoli di corrente a regime e di massima corrente di cortocircuito

<sup>50</sup> L'ipotesi di carico nullo, pur introducendo una approssimazione (si sottostima la GD installabile), è necessaria per poter condurre un raffronto semplice tra la potenza installabile compatibilmente a) con le soglie da sovraccarico e b) con le soglie di cortocircuito.

<sup>51</sup> Come peraltro derivabile per via intuitiva dalle regolazioni delle protezioni.

<sup>52</sup> Risultati analoghi si avrebbero considerando impianti di GD installati in rete senza convertitori statici.

### 5.3 Inversione di flusso e isola indesiderata

La reale incidenza dei problemi derivanti dall'isola indesiderata, già dettagliatamente discussi nello studio MT, è da valutare con attenzione nel contesto, strutturalmente assai diverso, delle reti BT.

Nello studio MT si era ben evidenziato come le modalità attuali di gestione delle reti (reti passive) siano praticabili anche in presenza di GD pur di non raggiungere condizioni di equilibrio tra il carico e la GD sottesa a una data porzione di rete (intera CP; singola linea MT). La presenza di inversione di flusso per soglie temporali convenzionali (5% del tempo su base annua) è stata assunta come indicativa di tali criticità sulla rete MT.

Per quanto attiene le reti BT, data la mancanza di sistemi di automazione evoluta<sup>53</sup>, l'inversione di flusso non crea problemi diretti sul funzionamento e sulla gestione del sistema né sull'eventuale formazione di isole indesiderate. Infatti, l'apertura delle linee BT (salvo manutenzioni) si ha esclusivamente in caso di guasto polifase (le linee BT, a differenza delle linee MT, non sono protette contro guasti a terra). In simili condizioni è difficile ipotizzare che la GD (anche qualora generazione e carico rimasti isolati rispetto al resto della rete siano bilanciati) sia in grado di sostenere l'isola, specie in presenza del guasto.

Nei rari casi di porzioni di rete rimaste isolate non in presenza di guasto, la assenza di richiuse rende la situazione accettabile: qualora tensione e frequenza derivassero dai valori nominali, l'intervento dei sistemi di protezione di interfaccia farebbe cessare immediatamente l'isola.

Infine, anche dal punto di vista della sicurezza delle persone, il sistema risulta comunque accettabilmente sicuro contro i contatti indiretti<sup>54</sup>.

Una crescente penetrazione della GD installata sulle reti BT può però portare ad un aumento della complessiva potenza da GD circolante sulle reti MT, rendendo più marcato il fenomeno di inversione del flusso di potenza all'interfaccia su tale livello di tensione, con tutti i conseguenti problemi già discussi nello studio MT, attinenti essenzialmente il corretto funzionamento delle protezioni di interfaccia, e la regolazione di tensione. Risulta pertanto di interesse, affinché la potenza effettivamente messa in gioco sulle reti BT non costituisca in futuro un reale problema, accelerare l'implementazione sulle reti elettriche MT di tecnologie innovative che consentano una gestione attiva della rete MT stessa, con riflessi positivi (e possibili sviluppi) per la BT sottesa.

<sup>53</sup> In particolare, non è prevista alcuna richiusura automatica sulle linee BT.

<sup>54</sup> Essendo il sistema transitoriamente di tipo IT (le macchine elettriche associate alla GD hanno il punto di neutro isolato, Norma CEI 11-20), un guasto a terra determina la circolazione di una corrente esigua, fornita dai soli accoppiamenti capacitivi dei cavi. Questa, a sua volta, comporta valori di tensione limitati sulle masse degli impianti, con rischi accettabili in caso di contatto.

## 6 Conclusioni

L'analisi condotta ha l'obiettivo di quantificare, pur su un campione ridotto opportunamente identificato, la massima potenza di GD installabile sulle attuali reti elettriche di distribuzione BT, nel rispetto dei principali vincoli tecnici vigenti (variazioni lente e rapide di tensione; limite di transito a regime sulle linee e sui trasformatori; incremento della corrente di cortocircuito). La valutazione della penetrazione di GD è stata effettuata su un campione di 16 reti di distribuzione (opportunamente identificate al fine di rappresentare, per quanto possibile, le diverse configurazioni riscontrabili nel contesto nazionale) tramite calcoli di load flow. Oltre ai dati elettrici delle reti, l'analisi ha richiesto la definizione di alcune ipotesi di contorno, necessarie per lo studio, in particolare circa il profilo di carico da associare agli Utenti passivi connessi.

Di seguito si riassumono i risultati dell'analisi, differenziando tra i vincoli relativi alla quantità di GD installabile in ciascun nodo e quelli inerenti alla potenza installabile in ciascuna rete vista nel suo complesso.

Tale distinzione è motivata dalle differenti ipotesi adottate in relazione al vincolo tecnico da studiare: i risultati ottenuti con approccio nodale (variazioni rapide e lente di tensione, limiti di transito) non sono direttamente confrontabili con quelli relativi allo studio delle reti nel loro complesso (incremento della corrente di cortocircuito e problemi associati alle protezioni).

### 6.1 Vincoli sulla quantità massima di potenza installabile in ciascun nodo

Di seguito vengono riassunti i risultati dell'analisi circa l'effetto che i tre vincoli tecnici considerati hanno sulla quantità massima di GD installabile in ogni nodo del campione di reti BT in esame; vengono ripresi i risultati di ciascun vincolo tecnico considerato separatamente, per poi valutare la quantità massima di GD compatibile con i tre vincoli assunti contemporaneamente.

I risultati inerenti al vincolo delle variazioni lente di tensione sono riportati al paragrafo 4.1.2. Dalla Figura 2 è possibile osservare come la potenza installabile in rete tale da non causare infrazione dei limiti superiori di tensione (110% della tensione nominale) sia ripartita piuttosto uniformemente sull'intervallo di potenza tra 10 e 300 kW. Un numero consistente di nodi (circa il 24%) presenta poi una hosting capacity, in riferimento alle variazioni lente di tensione, superiore a 300 kW.

Dal grafico cumulato in Figura 3, si osserva inoltre che vi possono essere criticità nell'installazione di generatori di taglia inferiore ai 30 kW solo nel 5% dei casi, percentuale che sale al 60% nel caso si consideri un valore di potenza pari a 100 kW. I nodi che presentano problemi