

# Regolazione di tensione nei sistemi di bassa tensione tramite On Load Tap Changer e altri dispositivi di regolazione

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

Candidato: Marco Nobile (s263604@studenti.polito.it), Relatore: Gianfranco Chicco (gianfranco.chicco@polito.it), Correlatore: Alessandro Ciocia (alessandro.ciocia@polito.it)  
Luglio 2021, Anno Accademico 2020/2021

**Riassunto** - In questa tesi si analizzano due reti elettriche di bassa tensione trifase e squilibrate le quali sono caratterizzate da un'elevata presenza di generazione fotovoltaica. Per ognuna di esse si calcolano i flussi di potenza tramite il metodo Backward Forward Sweep (BFS) e si effettua la regolazione di tensione tramite i seguenti dispositivi: On Load Tap Changer (OLTC), inverter fotovoltaici e Static Var Compensator (SVC). Questi ultimi due forniscono potenza reattiva induttiva o capacitiva per regolare la tensione nel nodo in cui sono collocati. Invece, l'OLTC, tramite un controllo proporzionale integrativo, modifica la posizione del tap del trasformatore MT/BT per ottenere il target di tensione desiderato. Si nota che tutti i dispositivi regolano la tensione in maniera indipendente per ogni fase. L'obiettivo è di valutare se l'utilizzo combinato dell'OLTC con altri dispositivi di regolazione, quali ad esempio gli inverter fotovoltaici, provoca un miglioramento dei risultati ottenuti, in termini di deviazione di tensione ( $VDEF$ ), perdite totali della rete ( $P_{tot}$ ) e numero di tap eseguiti ( $N_{tap}$ ). Tra tutti gli indicatori, il più significativo è il  $VDEF$  che tiene conto della deviazione di tensione rispetto al valore di riferimento unitario (1 p.u.). Si effettua un'analisi di Pareto per determinare le soluzioni non dominate, ovvero quelle appartenenti al fronte di Pareto. Inoltre, si applica il metodo TOPSIS per determinare la classifica delle migliori soluzioni della frontiera. Infine, si esegue un'analisi di sensitività per valutare come cambiano i risultati in funzione dei pesi attribuiti ad ogni funzione obiettivo.

**Parole chiave** — regolazione di tensione, rete di bassa tensione, sistema fotovoltaico, On Load Tap Changer, potenza reattiva, frontiera di Pareto, metodo TOPSIS, analisi di sensitività.

## I. INTRODUZIONE

Al giorno d'oggi, l'espansione della generazione distribuita nelle reti elettriche di distribuzione favorisce una minore dipendenza dalle grandi centrali elettriche di produzione.

Il numero dei sistemi di generazione distribuita, in particolare i generatori fotovoltaici, sta aumentando, ottenendo una riduzione delle emissioni di gas serra. A causa della vulnerabilità dell'irradianza solare e del vento, la generazione di energia è fortemente variabile e può causare elevate fluttuazioni di tensione che possono provocare problemi di power quality ai carichi connessi in rete. Per mitigare queste fluttuazioni e stabilizzare le tensioni nei limiti imposti dalle norme, si effettua la regolazione di tensione.

L'obiettivo di questa tesi è di studiare le modalità per eseguire la regolazione in reti di bassa tensione trifase e squilibrate caratterizzate da un'elevata presenza di generazione fotovoltaica, tramite i seguenti dispositivi: On Load Tap Changer (OLTC), inverter fotovoltaici e Static Var Compensator (SVC). Questi ultimi due forniscono potenza reattiva induttiva o capacitiva per regolare la tensione nel nodo in cui sono collocati. Invece, l'OLTC, tramite un controllo proporzionale integrativo modifica la posizione del tap del trasformatore MT/BT per ottenere il target di tensione desiderato.

Si analizzano diverse tipologie di regolazione, ma in particolare ci si focalizza sull'utilizzo combinato dell'OLTC con altri dispositivi, quali ad esempio gli inverter fotovoltaici, per valutare se si ottiene un miglioramento dei risultati, in termini di deviazione di tensione ( $VDEF$ ), perdite totali della rete ( $P_{tot}$ ) e numero di tap eseguiti ( $N_{tap}$ ). Tra tutti gli indicatori, il più significativo è il  $VDEF$  che tiene conto della

deviazione di tensione rispetto al valore di riferimento unitario (1 p.u.).

Si nota che nelle reti analizzate in questa tesi non c'è comunicazione nodale, infatti ogni dispositivo regola solo la tensione del nodo in cui è collocato senza avere informazioni di quello che avviene in altri nodi. Realizzare un sistema di coordinamento tra i vari nodi della rete è possibile, ma rende la regolazione più complicata e implica un notevole costo di installazione e manutenzione. Inoltre, la regolazione si esegue in maniera indipendente per ogni fase.

Per ogni rete analizzata, si calcolano i flussi di potenza applicando il metodo Backward Forward Sweep (BFS) che è valido per reti con struttura radiale e si effettua la regolazione distribuita tramite inverter fotovoltaici e/o centralizzata tramite OLTC o SVC.

Per stimare l'efficacia della regolazione si calcolano le perdite totali della rete e opportuni indicatori di tensione nel caso con e senza regolazione. In tal modo, si valutano i pro e i contro di ogni tipologia di regolazione considerando che l'obiettivo principale è di minimizzare gli indicatori di tensione e le perdite totali della rete.

A seguito della regolazione tramite i vari dispositivi, si effettua un'analisi di Pareto variando in maniera casuale per ogni scenario analizzato i parametri di funzionamento dei componenti, ad esempio i limiti di tensione dei generatori fotovoltaici e i parametri del controllo proporzionale integrativo dell'OLTC. In particolare, il numero di scenari totali è pari a mille e per ognuno di esso si ottengono delle soluzioni differenti. Dopodiché, dall'insieme di tutte le soluzioni calcolate, si determinano quelle appartenenti al fronte di Pareto, ovvero le soluzioni non dominate per i quali non esiste alcun punto che sia migliore contemporaneamente per tutte le funzioni obiettivo analizzate.

Successivamente, si applica il metodo TOPSIS per determinare la classifica delle migliori soluzioni appartenenti al fronte e analizzare i parametri di ingresso della regolazione che permettono di ottimizzare le soluzioni. Infine, si effettua un'analisi di sensitività per valutare come cambiano i risultati in funzione dei pesi attribuiti ad ogni funzione obiettivo.

Tutte le simulazioni sono sviluppate in ambiente Matlab, anche se in commercio esistono altri programmi, ad esempio OpenDSS utilizzato soprattutto per il calcolo dei flussi di potenza.

## II. PROCEDURA UTILIZZATA

In Figura 1 è rappresentato un diagramma di flusso in cui è indicata la procedura utilizzata per il calcolo dei flussi di potenza e per effettuare la regolazione di tensione.



Figura 1. Procedura utilizzata per il calcolo dei flussi di potenza e per effettuare la regolazione di tensione

Nello STEP#1 si definiscono i dati iniziali per il calcolo dei flussi di potenza, invece nello STEP#2 si sceglie il tipo di regolazione da effettuare. Nello STEP#3 si calcolano i flussi di potenza per ogni minuto della simulazione. Dopodiché, si esegue lo STEP#4 in cui si effettua la regolazione di tensione, anch'essa per ogni minuto. Successivamente, si esegue lo STEP#5 in cui nei nodi con presenza di inverter o SVC, in caso di violazione di tensione, si varia la potenza reattiva utilizzando la tecnica Perturba e Osserva (P&O) e si ricalcolano i flussi di potenza. Infine, allo STEP#6, si aggiorna il minuto della simulazione e si riesegue il ciclo dallo STEP#3. La procedura è ripetuta per ogni minuto della simulazione e quando essa termina, si ottengono per ogni nodo e ramo della rete tutte le tensioni e le correnti, quindi è possibile calcolare le perdite e confrontare i risultati nel caso con e senza regolazione. Si nota che nel caso di regolazione tramite OLTC, allo STEP#5 non viene fornita potenza reattiva, ma quando  $\alpha_{OLTC}$  (contatore sovra-sotto tensione) raggiunge o supera i limiti -1 o +1, si modifica la posizione del tap e al minuto successivo si ricalcolano i flussi di potenza con la nuova posizione.

### III. RISULTATI SIMULAZIONI

La Figura 2 mostra la struttura della rete di bassa tensione trifase relativa al caso studio 1.

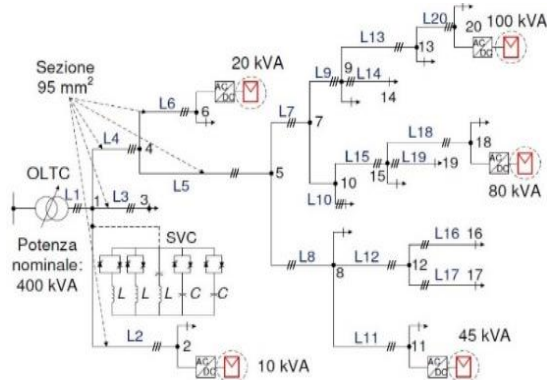


Figura 2. Struttura della rete di BT trifase del caso studio 1

In Figura 2 i nodi con presenza di generazione fotovoltaica sono: 2, 6, 11, 18 e 20.

La Figura 3 mostra il profilo di tensione con e senza regolazione mista (distribuita e centralizzata tramite OLTC) relativo al nodo 18 (vedasi Figura 2).

L'inverter fornisce potenza reattiva induttiva per stabilizzare la tensione sotto il limite di tensione superiore  $V_{range,max,PV}$ .

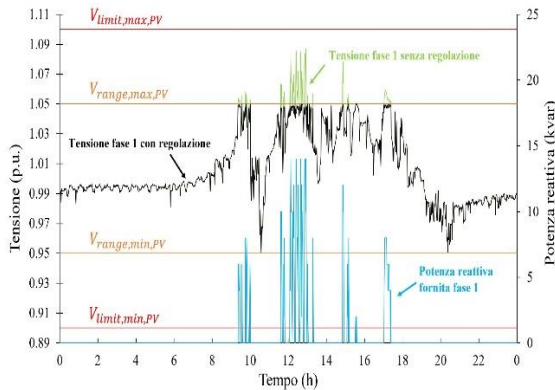


Figura 3. Profilo di tensione con e senza regolazione mista e di potenza reattiva fornita al nodo 18 (rete caso studio 1 – giorno 1)

In Figura 3, i limiti di tensione in arancione, ovvero  $V_{range,min,PV}$  e  $V_{range,max,PV}$  sono pari a 0.95 p.u. e 1.05 p.u. Al minuto in cui la tensione senza regolazione (vedasi profilo in

verde) è maggiore di  $V_{range,max,PV}$ , l'inverter fornisce potenza reattiva induttiva per diminuire la tensione e stabilizzarla sotto il limite (vedasi profilo in nero).

Nelle ore centrali della giornata le tensioni sono più elevate a causa del picco di irradianza solare, infatti tra le ore 12:00 e le 13:00, è necessaria maggiore potenza reattiva induttiva per mitigare la tensione.

### IV. CONCLUSIONI

Dai risultati delle simulazioni, si evince che effettuando la regolazione mista tramite inverter e OLTC si ottengono i seguenti valori delle funzioni obiettivo: minima deviazione di tensione pari a  $2.88 \cdot 10^{-4}$ , perdite totali pari a 179.2 kWh e numero di tap settimanali pari a 2. Invece, se si regola solo tramite inverter, la deviazione di tensione è pari a  $3 \cdot 10^{-4}$  e le perdite totali sono 177.7 kWh. Confrontando i risultati ottenuti, si afferma che la regolazione mista implica una diminuzione della deviazione di tensione del 4 % e un aumento delle perdite dello 0.8 %, a causa del numero di tap eseguiti che è pari a 2. Per ottenere questo numero di tap è stato utilizzato un valore di  $t_{amm}$  (tempo ammissibile violazione tensione) pari a 20 minuti e  $t_{min\_fra\_due\_tap}$  (tempo minimo fra due tap) di 30 minuti. Se si scelgono valori minori, ad esempio  $t_{amm}$  pari a 2.7 minuti e  $t_{min\_fra\_due\_tap}$  uguale a 26 minuti, si ha un incremento del numero di tap eseguiti da 2 a 14 e una diminuzione delle perdite totali da 177.7 kWh a 155.2 kWh e della deviazione di tensione da  $2.88 \cdot 10^{-4}$  a  $2.59 \cdot 10^{-4}$ .

I risultati delle simulazioni dimostrano che le potenzialità della regolazione tramite OLTC vengono esaltate nel caso in cui si utilizzano valori minori di  $t_{amm}$  e  $t_{min\_fra\_due\_tap}$ .

Complessivamente, si deduce che regolando tramite inverter e OLTC si ottengono risultati migliori rispetto ad altre tipologie di regolazione, tra cui quella distribuita tramite inverter.

Per quanto concerne i risultati ottenuti effettuando l'analisi di sensitività, si afferma che per ridurre maggiormente la deviazione di tensione conviene utilizzare dei parametri del controllo proporzionale integrativo minori e restringere la banda di regolazione delimitata da  $V_{range,min,PV}$  e  $V_{range,max,PV}$ . Inoltre, per quanto riguarda il metodo TOPSIS, se si vuole minimizzare maggiormente un parametro rispetto ad altri, conviene assegnare ad esso un peso maggiore, considerando che la somma dei pesi attribuiti ad ogni funzione obiettivo deve essere pari a 1.

In conclusione, dopo aver effettuato varie tipologie di regolazione, un'analisi di Pareto e di sensitività, si afferma che l'aumento del numero di tap ( $N_{tap}$ ) provoca una diminuzione della deviazione di tensione ( $VDEF$ ). Si nota che  $N_{tap}$  non deve essere troppo elevato per evitare di sollecitare eccessivamente i componenti interni dell'OLTC, aumentare i costi di manutenzione e ridurre la durata di vita del dispositivo.