



UNIONE EUROPEA  
Fondo Sociale Europeo  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



## **Avviso 1735 del 13.07.2017 MIUR**

Progetti di Ricerca Industriale e Sviluppo Sperimentale nelle 12 Aree di Specializzazione individuate dal PNR 2015-2020

---

# Definizione di criteri per la regolazione della tensione nei trasformatori MT/BT

*Rapporto Tecnico di Ricerca Industriale D6.3.b*



<b>Avviso</b>	Avviso 1735 del 13.07.2017 MIUR
<b>Codice progetto</b>	ARS01_01259
<b>Nome del progetto</b>	Community Energy Storage Gestione Aggregata di Sistemi di Accumulo dell'Energia in Power Cloud
<b>Acronimo</b>	ComESto
<b>Documento</b>	D6.3b
<b>Tipologia</b>	Rapporto Tecnico
<b>Data di Rilascio</b>	31/07/2020
<b>Obiettivo Realizzativo</b>	OR6
<b>Attività Realizzativa</b>	A6.3
<b>Soggetti Beneficiari Proponenti</b>	E-Distribuzione
<b>Elaborato (Nome, Cognome – Soggetto Beneficiario)</b>	Carla Marino, Stefano Riva – E-DISTRIBUZIONE
<b>Verificato (Nome, Cognome – Soggetto Beneficiario)</b>	Gianluca Sapienza, Claudio Alberti, Francesco Dura – E-DISTRIBUZIONE
<b>Approvato (Nome, Cognome – Soggetto Beneficiario)</b>	Membri del PEB

## Indice

---

1.EXECUTIVE SUMMARY.....	7
2.STATO DELL'ARTE.....	8
3.GESTIONE DELLE VIOLAZIONI DEI LIMITI DI TENSIONE.....	8
4.REGOLAZIONE DI TENSIONE SUI TRASFORMATORI AT/MT .....	9
5.APPLICAZIONI ADMS SUI TR MT/BT DELLA RETE DI GAETA .....	12
6.EVOLUZIONE DELLE TECNICHE DI REGOLAZIONE PER TR MT/BT .....	12
7.1 Scenario 1 .....	13
7.2 Scenario 2 .....	15
7.3 Confronto tra i due scenari.....	17
7.CARATTERISTICHE DEL REGOLATORE DI TENSIONE DI CS.....	17
8.CONCLUSIONI .....	20

## Indice delle figure

---

Figura 1 - Regolazione evoluta della tensione. ....	<b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b>
Figura 2 – Integrazione di sistemi e dispositivi per la regolazione dei TR AT/MT.....	11
Figura 3 – Scenario 1: Integrazione dei sistemi ADMS BT, SCADA e dispositivi di campo. ....	13
Figura 4 – Sistema di telecontrollo della rete BT. ....	14
Figura 5 – Scenario 2: Integrazione dello SCADA e dispositivi di campo. ....	15

## Abbreviazioni ed acronimi

Abbreviazione/Acronimo	Testo Esteso
ADMS	Advanced Distribution Management System
Al-BerT	Sensore di bassa tensione
ARERA	Autorità di Regolazione per Energia, Reti e Ambienti
AT	Alta Tensione
BT	Bassa Tensione
CE	Contatore Elettronico
Centro Operativo	Centro di controllo con compiti di monitoraggio e conduzione di specifiche porzioni della rete di distribuzione a livello inter o intra-regionale. Nel Centro Operativo sono ubicati i sistemi SCADA e ADMS, con le rispettive stazioni operative gestite 24h su 24, 7gg su 7
CP	Cabina Primaria
CS	Cabina Secondaria
DSO	Distribution System Operator
DV7500	Protezione Integrata del Trasformatore AT/MT di E-distribuzione
FER	Fonti Energetiche Rinnovabili
ICS	Interruttore di Cabina Secondaria
IED	Intelligent Electronic Device
IMS	Interruttore di Manovra Sezionatore
LF	Load Flow
MT	Media Tensione
NLTC	No Load Tap Changer
OdM	Organo di Manovra
OLTC	On Load Tap Changer
RAT	Regolazione Automatica della Tensione
RGDM	Rilevatore di Guasto Direzionale e Misure
RTU	Remote Terminal Unit
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SE	State Estimation
ST	Sistema di Telecontrollo
STB	Sistema di Telecontrollo della Bassa Tensione
STM	Sistema di Telecontrollo della Media Tensione

TA	Trasformatore Amperometrico
TF	Trust Factor
TIQE	Testo integrato della regolazione output-based dei servizi di distribuzione e misura dell'energia elettrica
TPT	Terminale Periferico di Telecontrollo
TR	Trasformatore
TV	Trasformatore Voltmetrico
UP	Unità Periferica
VSC	Variatore Sotto Carico

## 1. EXECUTIVE SUMMARY

Il presente documento, deliverable del progetto ComESto, descrive i risultati relativi alle attività svolte nell'ambito dell'attività **6.3 "Tecnologie per l'automazione evoluta della rete di distribuzione"**, dell'Obiettivo Realizzativo 6 (OR6).

In linea con gli obiettivi progettuali, le attività condotte sono state orientate allo studio ed alla validazione di strumenti innovativi per l'applicazione di nuovi criteri di regolazione della tensione per i TR MT/BT.

In generale, gli obiettivi del progetto ComESto mirano a definire linee di ricerca ed individuare spazi applicativi per sviluppare soluzioni tecnologiche e sistemiche innovative ed a valore aggiunto per la "smartizzazione" di DC nanogrid asservite all'alimentazione di utenze civili (Consumer/Prosumer) e per l'integrazione di generazione da FER e accumulo presso Producer, con l'obiettivo finale di favorire il processo di industrializzazione dei risultati e dei prodotti della ricerca:

- sviluppando nuove metodologie per analisi tecnico-economiche necessarie alla pianificazione della rete elettrica di distribuzione;
- rendendo i clienti connessi alla rete di distribuzione sempre più attivi e sempre più al centro nella gestione dell'energia elettrica.

Con l'evolversi del sistema elettrico ed una sempre più crescente presenza di produzione da fonti rinnovabili e risorse di accumulo, la rete di distribuzione ha subito nel tempo dei cambiamenti tali per cui risulta sempre più necessario attuare delle misure al fine di evitare sovraccarichi, gestire i guasti e ridurre disturbi sulla rete elettrica e quindi sui clienti connessi ad essa. Per far questo, il DSO ha l'obbligo che su tutti i nodi della rete di distribuzione sia garantita una certa qualità del servizio, i cui vincoli verranno illustrati all'interno di questo documento.

Le tecnologie Smart Grids definite sinora, anche nell'ambito del progetto ComESto, fanno dunque sì che possano essere attuate delle tecniche di regolazione avanzate sulla rete di Media e Bassa Tensione, dimodoché la qualità della tensione di rete sia lungo le linee sia presso i clienti rispetti sempre determinati vincoli di sicurezza.

Il documento illustra quindi le attuali modalità di gestione delle violazioni dei limiti di tensione della rete BT e lo stato dell'arte nell'evoluzione delle tecniche di regolazione della tensione, sui trasformatori AT/MT delle reti di E-distribuzione, attuate in ottica smart grid.

Le nuove modalità di regolazione qui teorizzate saranno utili alla pianificazione di rete, come supporto per modificare strategie e scelte relative al posizionamento degli impianti, alla scelta dei componenti, ed in generale ai criteri di progetto della rete di distribuzione.

## 2. STATO DELL'ARTE

La regolazione sulla rete di bassa tensione è una procedura di norma effettuata all'attivazione di una nuova cabina di trasformazione oppure all'occorrenza. Essa viene eseguita impostando manualmente il variatore di tensione del trasformatore MT/BT al valore opportuno; in particolare le procedure di regolazione vengono svolte offline e quindi disalimentando preventivamente la porzione di rete interessata.

La regolazione della tensione è una procedura che si rivela necessaria al fine di evitare o ridurre le violazioni di tensione nella rete di distribuzione. E-distribuzione ha definito alcuni criteri, tra i quali:

- le linee guida per il monitoraggio dell'ampiezza della tensione di alimentazione nella rete BT;
- gli eventuali interventi tecnici da adottare, in caso di non conformità o "Fuori Standard", per il ripristino delle condizioni di esercizio congruenti con la norma.

## 3. GESTIONE DELLE VIOLAZIONI DEI LIMITI DI TENSIONE

Il monitoraggio della tensione BT avviene mediante l'analisi della qualità della tensione registrata da Contatori Elettronici (CE) installati in alcuni punti strategici della rete (come ad esempio "Monte linea", "Valle linea", "Produttore").

A valle del monitoraggio della tensione, è possibile identificare le violazioni qualora la tensione stessa non rientri all'interno di precisi intervalli di valori, che possono essere più o meno mediati lungo un certo periodo di tempo.

Principalmente si definiscono due tipologie di violazione:

- fuori standard per campione nel caso in cui il 5% del totale dei campioni, mediati ai 10 minuti, presentano tensione al di fuori dell'intervallo  $\pm 10\%V_n$ ;
- fuori standard per tensione nel caso in cui almeno un campione presenti un valore di tensione al di fuori dell'intervallo  $[V_n + 10\% V_n; V_n - 15\% V_n]$ .

Inoltre, il TIQE ARERA<sup>1</sup>, all'art. 67, introduce due soglie di gravità:

- la percentuale di intervalli di 10 minuti con valore della tensione efficace entro il  $\pm 10\%$  rispetto al valore nominale, è inferiore all'85%;
- la percentuale di intervalli di 10 minuti con valore della tensione efficace entro il  $+10\% / -15\%$  rispetto al valore nominale, è inferiore al 90%.

---

<sup>1</sup> <https://www.arera.it/it/docs/19/566-19.htm>

Al fine di gestire le violazioni di tensione, e-distribuzione prevede una serie di azioni da svolgere per il monitoraggio e, onde necessarie, specifiche modalità di intervento. Queste azioni possono essere dettate da un'esigenza interna di monitoraggio dei livelli di tensione o, come già anticipato, da prescrizioni dell'Autorità inerenti alla qualità del servizio, dall'analisi dei parametri di rete o dalla risoluzione di un reclamo.

Gli interventi che possono essere intrapresi dal distributore a valle di questo processo possono essere tra i più svariati e dettati da esigenze di esercizio diverse:

- Ri-equilibratura dei carichi sulle diverse fasi della linea BT;
- Modifica del sezionamento di confine a schema normale (valutazione dello schema migliore);
- Modifica della posizione del variatore a vuoto del TR MT/BT;
- Spostamento di uno o più Clienti BT su altra linea limitrofa;
- Potenziamento della linea BT;
- Costruzione di una nuova linea BT;
- Potenziamento TR;
- Installazione di un nuovo TR in cabina secondaria;
- Costruzione di una nuova cabina secondaria;
- Intervento sul misuratore in caso di anomalie.

#### 4. REGOLAZIONE DI TENSIONE SUI TRASFORMATORI AT/MT

Ciò che si vuole investigare maggiormente ai fini del progetto ComESTo è la modifica della posizione del variatore sotto carico dei trasformatori MT/BT in modalità automatica, similmente a quanto avviene già sui trasformatori AT/MT di cabina primaria.

Prima della diffusione delle RES nella rete di distribuzione di media e bassa tensione, il sistema energetico italiano è stato caratterizzato da una rete elettrica alimentata da un flusso energetico monodirezionale dalla rete di trasmissione verso la rete di distribuzione.

In questo scenario, tutti i clienti della rete di distribuzione sono di tipo passivo e l'energia ha un flusso unidirezionale dagli impianti di generazione verso il carico.

Lungo le linee la tensione si riduce progressivamente e la caduta di tensione è espressa da:

$$\Delta V = ZII$$

dove  $Z = R + j\omega L$  è l'impedenza di linea per unità di lunghezza ( $\Omega/\text{km}$ ),  $l$  è la lunghezza della linea (km) e  $I$  è la corrente di linea (A).

Il DSO ha l'obbligo di garantire che su tutti i nodi della rete di distribuzione la tensione si trovi nell'intervallo  $[-10,+10]\%$  di  $V_n$  e può farlo, con riferimento alla rete MT, mediante due tecniche di

regolazione che intervengono, impiegando il pannello di Regolazione Automatica della Tensione (RAT), sull'avvolgimento primario del trasformatore AT/MT.

La prima tecnica è il compound di corrente, per cui si ha:

$$V_{sb\ MT} = V_{rif} + k \cdot I_{trafo}$$

dove la tensione di sbarra sarà pari alla somma tra la tensione di riferimento ed un contributo della corrente moltiplicata per un coefficiente di natura resistiva.

Infine, si ha la regolazione a valore fisso dove è richiesto al pannello di regolazione del variatore AT/MT di imporre un valore di riferimento per una certa durata di tempo.

$$V_{sb\ MT} = V_{rif}$$

A valle dei provvedimenti previsti dalle manovre finanziarie approvate dal parlamento italiano tra il 2007 e il 2012, il rilascio di incentivi ha favorito la diffusione di fonti non programmabili connesse alla rete di distribuzione; in questo caso il flusso di rete è diventato di tipo multidirezionale e possono crearsi congestioni e fenomeni di risalita.

In questo scenario, i clienti della rete di distribuzione possono essere anche di tipo attivo e, per tale motivo, le tecniche di regolazione sopraelencate non sono più funzionali: nel caso del compound di corrente, la relazione tra la corrente sul trasformatore ed il carico passivo connesso in rete non è più valida, poiché la potenza iniettata in rete favorisce la diminuzione della corrente assorbita dai carichi passivi. Nel caso della regolazione a valore fisso, occorrerebbe impostare una taratura sul pannello di regolazione del variatore AT/MT con un valore di tensione MT tale per cui la regolazione non possa comunque essere efficace per lunghi periodi.

Si rivelano quindi necessarie nuove modalità di regolazione che possono essere implementate con l'ausilio di dispositivi di nuova generazione e di un assetto di rete ottimale.

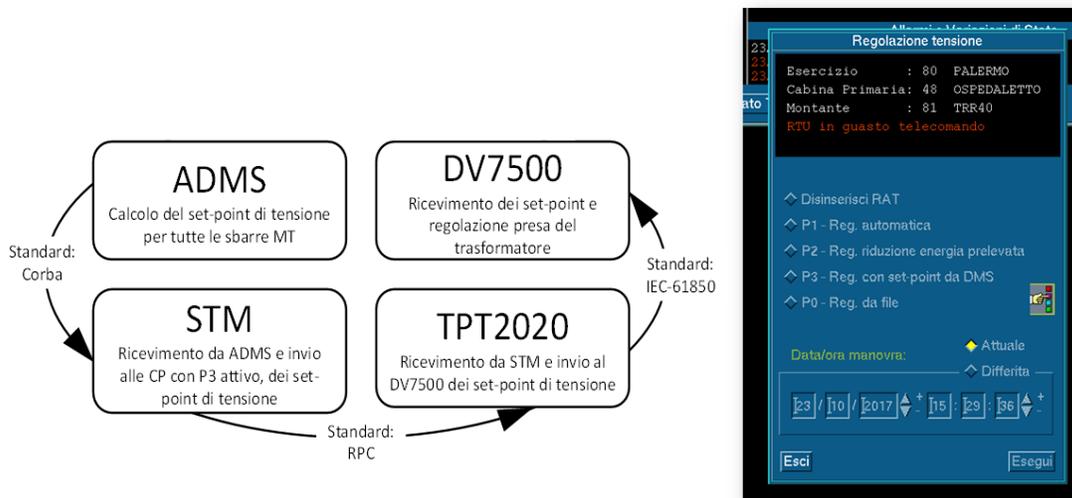


Figura 1 - Regolazione evoluta della tensione.

Secondo quanto stabilito da e-distribuzione, la funzione di regolazione evoluta di tensione può essere posta in esercizio su qualsiasi Cabina Primaria digitale equipaggiata con la nuova RTU di cabina primaria TPT2020 e il nuovo pannello di protezione integrata del trasformatore DV7500, che integra anche la funzionalità di regolazione del variatore sotto carico del trasformatore AT/MT (Figura 1).

Questa tipologia di protezione integrata, a dispetto del vecchio pannello di regolazione impiegato per la sola funzionalità RAT, può acquisire sia le misure di corrente da TA sia le misure di tensione da TV; queste ultime, infatti, non venivano acquisite mediante l'impiego della precedente generazione di dispositivi.

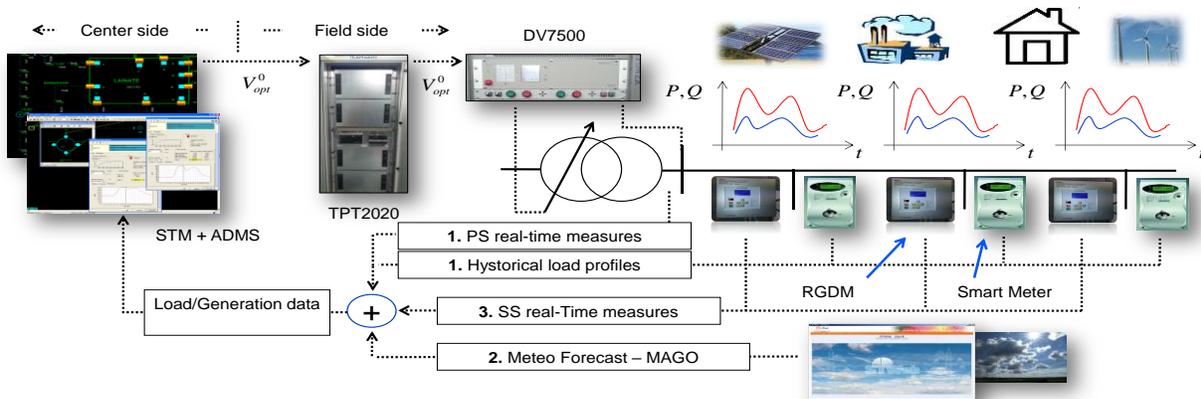


Figura 2 – Integrazione di sistemi e dispositivi per la regolazione dei TR AT/MT.

La Figura 2 mostra l'architettura dei dispositivi di cabina primaria e dei sistemi SCADA, in cui:

- TPT2020 acquisisce le misure relative alle grandezze elettriche dai pannelli di protezione delle linee MT;
- Il sistema centrale SCADA STM riceve i valori delle misure correnti dal TPT2020;
- ADMS (Sistema centrale di calcoli elettrici) calcola i set-point di tensione per tutte le sbarre MT alimentate dalle cabine primarie gestite da ciascun Centro Operativo;
- I valori di tensione vengono trasferiti al sistema centrale SCADA, tramite dati dinamici;
- Lo SCADA trasferisce i valori di tensione alle sole Cabine Primarie dove la funzione di regolazione è stata posta in esercizio;
- TPT2020 riceve il set point di tensione e lo invia al DV7500;
- DV7500 riceve un valore di tensione e modifica la posizione del VSC (noto anche come OLTC), fin quando il valore misurato non raggiunga il valore calcolato: quando si agisce sul variatore sotto carico, si ha una variazione a gradini (discreta) della tensione.

L'ADMS agisce garantendo che su tutti i nodi MT la tensione non vada al di sotto del 94% di  $V_n$  e che la tensione sulle sbarre MT non ecceda il 10% di  $V_n$  o non vada al di sotto di  $V_n$ . Chiaramente questi vincoli sono tarabili ma sono sì impostati al fine di rispettare gli intervalli previsti al paragrafo 3.

Il calcolo del set point di tensione avviene:

- Alle 23:00, dove il set point è valido per 25 ore (fino alla mezzanotte del giorno successivo);
- Ogni 60 minuti, tenendo conto delle misure in tempo reale;
- Su cambio topologico, dopo un'attesa di consolidamento dell'assetto di rete di 5 minuti (onde evitare ricalcoli dopo interventi di automazione di rete su guasto).

## 5. APPLICAZIONI ADMS SUI TR MT/BT DELLA RETE DI GAETA

Tra il 2017 e il 2018 e-distribuzione ha condotto degli studi incentrati sull'impiego di ADMS per la regolazione della tensione mediante variazione offline del VSC (No Load Tap Changer) dei TR MT/BT. Lo studio è stato mirato a definire modalità di regolazione di tensione TR MT/BT alternative, con applicazioni particolari sulla rete BT sottesa alla rete MT alimentata dalla CP Gaeta.

Il risultato dello studio ha permesso di mettere le basi per dei nuovi requisiti per le tecniche di regolazione evolute e illustrate in questo rapporto tecnico.

## 6. EVOLUZIONE DELLE TECNICHE DI REGOLAZIONE PER TR MT/BT

Finora è stato fatto un excursus circa le tecniche di regolazione della tensione adoperate in corrispondenza dei diversi livelli di tensione della rete di distribuzione, consentendo di entrare nel

merito di quelli che sono ad oggi i limiti delle modalità di regolazione della tensione impiegate sulla rete BT.

La rete di distribuzione è fortemente legata alle caratteristiche stesse della rete, che dipendono dalla sua estensione, dai componenti che la costituiscono e anche dalla tipologia di clienti che essa ospita.

Come anticipato al paragrafo 4, la rete di distribuzione oggi ospita anche clienti di tipo attivo e in questo tipo di contesto, il DSO è chiamato a operare come un vero e proprio System Operator della rete di distribuzione, gestendo i flussi di energia e le criticità di rete che possono insorgere anche a seguito dei cambi assetto e delle variazioni di tensione, cercando di garantire un’elevata qualità del servizio elettrico nei nodi di rete e in prossimità dei punti di connessione con i clienti.

Le tecniche di regolazione finora illustrate nell’ambito della rete di media tensione, perseguite anche in diversi progetti sperimentali (tra i quali Grid4EU, Puglia Active Network ed EUSysFlex), consentono di evitare l’insorgere di violazioni ed anche di aumentare l’Hosting Capacity della rete, vale a dire la capacità di accogliere energia da Generazione Distribuita senza compromettere l’affidabilità della rete elettrica.

L’evoluzione delle tecniche di regolazione per TR MT/BT prevede l’impiego di strumenti differenti. In tal senso si possono identificare due scenari di applicazione in cui vengono impiegati in modo alternativo sistemi SCADA, sistemi di stima dello stato della rete BT e dispositivi di telecontrollo e misura delle reti MT e BT.

### 7.1 Scenario 1

Nel primo scenario, illustrato in **Errore. L’origine riferimento non è stata trovata.**, viene proposta una prima modalità di integrazione tra sistemi e dispositivi destinati alla regolazione dei TR MT/BT.

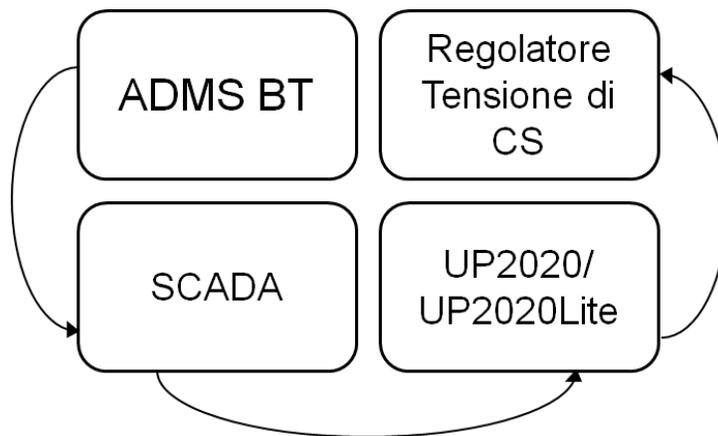


Figura 3 – Scenario 1: Integrazione dei sistemi ADMS BT, SCADA e dispositivi di campo.

In esso viene identificato un flusso di dati tra il sistema ADMS BT, i sistemi SCADA ST, i dispositivi di telecontrollo ed attuazione di cabina secondaria UP2020 e UP2020Lite ed il regolatore di tensione di CS.

Lo SCADA viene correntemente impiegato per scopi di telecontrollo e di gestione della rete ed include già le funzioni di regolazione dei TR AT/MT illustrati nel paragrafo 4.

Esso include tra gli altri il sistema di telecontrollo della bassa tensione, che consente la rilevazione automatica delle disalimentazioni AT e MT e la rappresentazione delle disalimentazioni da interruttori BT telecontrollati.

Il grafico del sistema è illustrato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

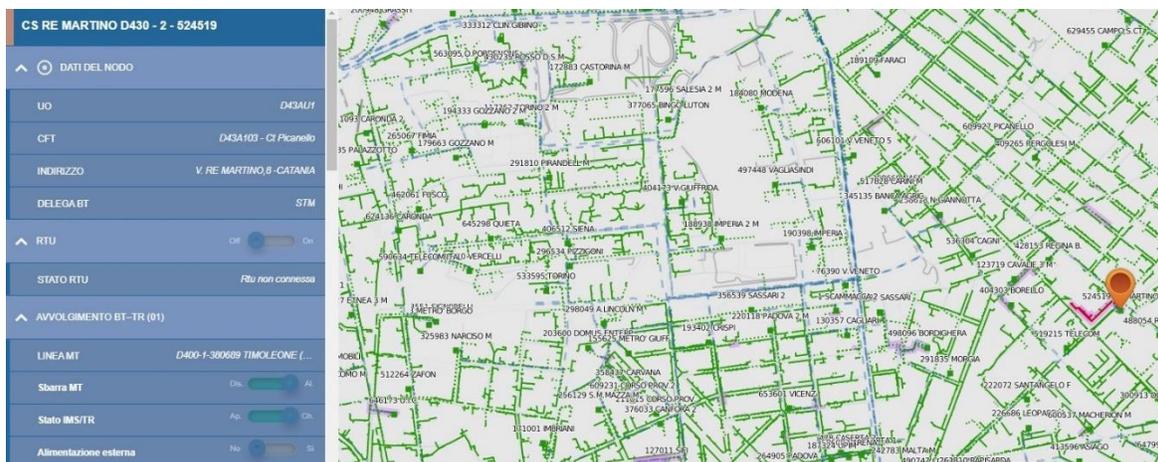


Figura 4 – Sistema di telecontrollo della rete BT.

Il sistema ADMS BT, con capacità di elaborazione anche della rete di bassa tensione, ad oggi in fase di definizione dei requisiti, rappresenta un sistema di calcoli elettrici e stima dello stato con caratteristiche analoghe a sistema ADMS impiegato nella rete di media tensione ed illustrato anch'esso al paragrafo 4, integrabile con lo SCADA, di supporto all'esercizio ed alla pianificazione della rete BT.

Un sistema siffatto consente di:

- Eseguire Load Flow sulla rete BT, ottimizzazione perdite, bilanci di energia;
- Integrazione di allarmi e misure BT raccolte da STM (mediante sensori AI-BerT);
- Confluenza in SCADA ST dei dati dei rilevatori di guasto installati lungo linea e delle misure stimate in corrispondenza dei TR MT/BT e dei set point di tensione.

In questo scenario l'UP2020 riceve un set-point di tensione da SCADA (dopo che ADMS BT ne avrà svolto il calcolo) e lo trasferisce al regolatore di tensione.

Il ruolo dell'UP in questo caso è dedicato al trasferimento del dato, per cui non viene eseguito nessun controllo di qualità del valore.

A seguito di indisponibilità di collegamento tra le RTU di cabina secondaria e SCADA, sull'UP resta disponibile l'ultimo valore ricevuto. Quando è ripristinata la connessione, il valore viene automaticamente aggiornato, secondo la logica medesima della regolazione AT/MT.

Da un punto di vista teorico, il regolatore di tensione può essere integrato all'interno dell'UP stessa.

## 7.2 Scenario 2

In questo secondo scenario, l'UP2020 è designata a svolgere funzioni di controllore di Cabina Secondaria, in modo che essa possa prendere decisioni autonome sulle regolazioni in Cabina Secondaria (controllo della tensione di sbarra BT).

Questo scenario non prevede l'impiego del sistema ADMS BT individuato nello scenario illustrato nel paragrafo 7.1.

In **Errore**. **L'origine riferimento non è stata trovata**. viene illustrato lo schema di integrazione individuato in questo scenario.

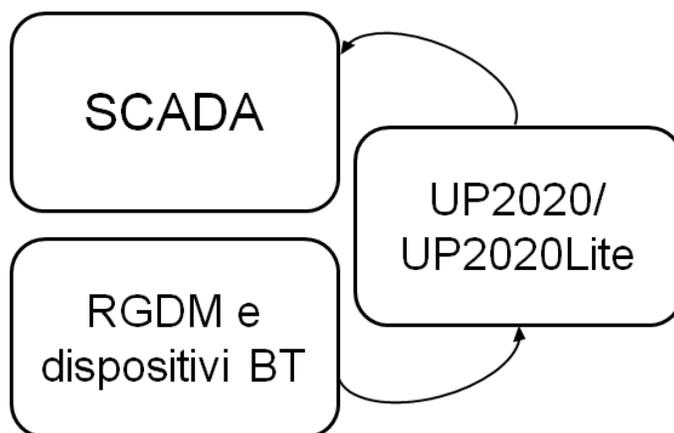


Figura 5 – Scenario 2: Integrazione dello SCADA e dispositivi di campo.

Come già anticipato nel precedente scenario, da un punto di vista teorico, il regolatore di tensione può essere integrato all'interno dell'UP stessa. Inoltre, nell'UP2020 possono essere implementati degli specifici algoritmi di Electrical Calculation per Load Flow (LF) e State Estimation (SE).

Per far questo, l'UP2020 deve ricevere alcuni dati in ingresso, normalmente impiegati anche dagli algoritmi del sistema ADMS:

1. Dati statici, composti da:
  - a. Caratteristiche elettriche della rete, ricevute mediante files.xml;
  - b. Caratteristiche di consumo delle utenze attive e passive (curve di potenza attiva/reattiva quartorarie di trasformatori MT/BT e utenze MT), ricevute mediante files.txt.

2. Dati dinamici, composti da:

- a. Stato degli OdM della rete di competenza, acquisiti fisicamente dall'UP2020, oppure ricevuti da altre UP2020 via protocollo;
- b. Misure di tensione, corrente, potenza attiva, potenza reattiva della rete di competenza, acquisite fisicamente dall'UP2020 dai dispositivi RGDM o altri dispositivi di campo, oppure ricevute da altre UP2020 via protocollo.

L'algoritmo deve utilizzare i risultati dei calcoli elettrici di LF e SE e si focalizza sulla rete BT di competenza.

La **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** illustra i vincoli di tensione da mantenere nelle impostazioni del regolatore, fissando i limiti di tensione minima ammissibile nel nodo critico di rete, di tensione minima impostabile sulla sbarra BT e chiaramente il limite sulla tensione massima.

Tabella 1 – Vincoli di tensione impostabili sul regolatore

Simbolo	Significato	Valore di default
$V_{min,cr}$	Tensione minima ammissibile nel nodo critico	94 % $V_n$
$V_{minSB}$	Tensione minima impostabile sulla sbarra BT	90 % $V_n$
$V_{maxSB}$	Tensione massima impostabile sulla sbarra BT	110 % $V_n$

L'algoritmo deve operare inoltre secondo la seguente sequenza logica:

- Con il regime ipotizzato di generazione ridotta, viene individuato il nodo critico della rete BT, ovvero il nodo che ha tensione più bassa, e ne calcola la sua tensione  $V_{cr}$ .
- Con regime ipotizzato di generazione ridotta si intende alternativamente:
  - la potenza di generazione moltiplicata per il trust factor TF (tenendo conto della **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**);
  - l'azzeramento completo della potenza di generazione.
- Calcolata  $V_{cr}$ , la tensione di set-point  $V_{set}$  della sbarra BT viene incrementata sino a che  $V_{cr} = V_{min,cr}$ . La tensione  $V_{set}$  risultante è il set-point da inviare al regolatore del VSC BT in quell'istante (dovrà essere considerato il set point più elevato tra quello delle tre fasi di linea).
- 

Tabella 2 - Elenco Trust Factor per tipologia di impianto

Tipo impianto	Trust factor generatore (TF) [p.u.]
Solare	0,3
Eolico	0,5
Biomassa	0,8
Idroelettrico	0,8
Gas	0,8
Fossile	0,8

Altro	0,8
-------	-----

### 7.3 Confronto tra i due scenari

La Tabella 3 di seguito illustrata include le principali caratteristiche dei due scenari di regolazione dei TR MT/BT illustrati nei paragrafi precedenti.

Tabella 3 – Confronto tra i due scenari

Scenario	Scenario 1	Scenario 2
<b>Presenza ADMS BT</b>	Sì	No
<b>Stima dello stato e calcoli di rete</b>	ADMS BT	UP2020Lite/2020
<b>Regolatore di tensione</b>	UP2020Lite/2020 Regolatore esterno	UP2020Lite/2020 Regolatore esterno

Da questa rappresentazione sintetica si evince che nello Scenario 1 la stima dello stato della rete di distribuzione BT è affidata centralmente al sistema ADMS BT, in maniera analoga a quanto viene svolto oggi dall'ADMS e dal DV7500 sulla rete di Media Tensione.

Il regolatore di tensione può essere incluso nei dispositivi UP2020Lite/2020 o integrabile ad essi ed è in ambedue gli scenari il dispositivo deputato all'implementazione fisica del set-point di tensione sulla sbarra.

Lo Scenario 2 presenta la stessa funzionalità mediante l'utilizzo di una modalità edge, in cui localmente l'UP eseguendo calcoli elettrici di Load Flow e Stima dello Stato agisce rapidamente sul VSC del TR MT/BT.

Come risultato del confronto si ha che nello Scenario 1 i dispositivi di campo sono integrati con sistemi avanzati di calcoli di rete, che consentono una valutazione estesa della stima dello stato dell'intera rete BT, con necessità di comunicazione performante e azioni che richiedono un tempo di intervento maggiore. Al contrario, nello Scenario 2, l'UP è chiamata a svolgere azioni nuove e innovative rispetto ai normali compiti di telecontrollo e automazione, rendendo più veloce l'elaborazione e l'attuazione delle azioni correttive per la regolazione della tensione.

## 7. CARATTERISTICHE DEL REGOLATORE DI TENSIONE DI CS

Analogamente a quanto definito nelle modalità di regolazione illustrate al paragrafo 4 relativamente alle logiche della protezione integrata del trasformatore AT/MT DV7500, il regolatore di tensione di CS può essere integrato all'interno della stessa UP2020. Esso deve quindi ricevere un valore di tensione e modificare la posizione del variatore sotto carico fin quando il valore di tensione misurato non abbia raggiunto il valore calcolato.

In base a quanto illustrato al paragrafo precedente, il regolatore deve tenere conto dei vincoli di tensione minima e massima di cui alla Tabella 1 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** del paragrafo 7.2, dove  $V_n$  è la tensione nominale BT. Il controllo di qualità del set point di tensione può essere effettuato opportunamente se all'interno del regolatore di tensione sono configurate delle logiche specifiche ed alcuni parametri di taratura.

Oltre ai valori nominali di targa del VSC e dei sensori impiegati, occorre impostare alcuni coefficienti che tengano conto della variazione a gradini della tensione al variare della posizione di presa del VSC. Ciò è facilmente dimostrabile prendendo in esempio un trasformatore MT/BT con i seguenti dati di targa.

Tabella 4 – Dati di targa di un trasformatore MT/BT.

Potenza nominale	$A_n$	630 kVA
Tensione primaria	$V_{1n}$	20 kV
Tensione secondaria a vuoto	$V_{20}$	400 V
Numero prese	$N$	5
Variazione percentuale al cambio di presa	$\Delta u_r$	2,5 %

Si calcola la variazione di tensione  $\Delta V$  corrispondente alla variazione percentuale indicata in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

$$\Delta V = \Delta u_r \frac{V_{1n}}{100} = 2,5 \frac{20000}{100} = 500 \text{ V}$$

In generale il rapporto di trasformazione di una macchina è definito come:

$$\frac{V_{1n}}{V_{20}} = \frac{N_1}{N_2}$$

dove  $N_1$  e  $N_2$  sono le spire al primario e al secondario. La variazione di tensione si ottiene variando il numero di presa al primario  $N_1$ , mentre il numero di presa al secondario  $N_2$  resta costante.

Ciò che però si osserva, variando il numero di presa, è una variazione di tipo non lineare della tensione: noto quindi il valore  $\Delta V$  corrispondente al singolo cambio presa, è definito  $k_p$  il rapporto di trasformazione corrispondente ad ogni singola presa.

$$k_p = \frac{V_{1n} + n^{\circ} \text{presa} \cdot \Delta V}{V_{20}}$$

Sostituendo opportunamente il numero di presa, è possibile calcolare il rapporto di trasformazione tenendo conto del numero di presa e del corrispondente valore di tensione secondaria.

$$k_{-2} = \frac{V_{1n} + n^{\circ}presa \cdot \Delta V}{V_{20}} = \frac{20000 + (-2 \cdot 500)}{400} = 47,5$$

$$V_{20} = \frac{V_{1n}}{k_{-2}} = \frac{20000}{47,5} = 421,05 \text{ V}$$

Questo procedimento viene ripetuto per cinque volte in totale, ottenendo i risultati illustrati in Tabelal 5.

Tabella 5 – Rapporto di trasformazione per una macchina con 5 prese e  $K=20/0,4$ .

Numero di presa	$k_p$	$V_{20}$ [V]
-2	47,5	421,05
-1	48,75	410,25
0	50	400
1	51,25	390,24
2	52,5	380,95

Dalla **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si deduce quindi che il rapporto di trasformazione di un trasformatore non è di per sé costante ma varia in funzione della presa del VSC. Di conseguenza anche la tensione secondaria a vuoto sarà una funzione del numero di presa ed è dunque possibile valutare la differenza di tensione nel passare tra una presa e l'altra, ottenendo il risultato esposto di seguito:

- $N=-2 \rightarrow N=-1, \Delta V_{20} = V_{20}(-2) - V_{20}(-1) = 10,8 \text{ V}$
- $N=-1 \rightarrow N=0, \Delta V_{20} = V_{20}(-1) - V_{20}(0) = 10,25 \text{ V}$
- $N=0 \rightarrow N=1, \Delta V_{20} = V_{20}(0) - V_{20}(1) = 9,76 \text{ V}$
- $N=1 \rightarrow N=2, \Delta V_{20} = V_{20}(1) - V_{20}(2) = 9,29 \text{ V}$

Da questi calcoli si evince inoltre che la differenza maggiore si ha passando dalla presa  $N=-2$  alla presa  $N=-1$ .

Da questi dati è possibile comprendere di quanto effettivamente la tensione misurata si discosti dalla tensione impostata dal regolatore di CS.

Individuato infatti il valore di  $\Delta V_{20} = 10,8 \text{ V}$ , si può procedere al calcolo della banda morta  $\alpha$  e dell'isteresi della banda morta  $\beta$  da impostare sul regolatore.

La banda morta del regolatore rappresenta un parametro di natura strategica che consente al regolatore di effettuare o meno la manovra sul VSC. Qualora la differenza tra la tensione misurata e la tensione da impostare risultasse superiore al valore della banda morta  $\alpha$ , il regolatore effettuerebbe la manovra sul VSC; viceversa, se questa differenza di tensione fosse inferiore al valore di  $\alpha$ , il cambio di presa non avverrebbe.

La banda morta percentuale è espressa dalla formula seguente, tenendo conto di un fattore di correzione che può variare da 1,2 a 1,3.

$$\alpha_{\%} = 100 \frac{\Delta V_{20}}{2V_n} (1,2 \div 1,3)$$

$$\alpha_{\%} = 100 \frac{\Delta V_{20}}{2V_n} \cdot 1,2 = 100 \frac{10,8 V}{2 \cdot 400 V} \cdot 1,2 = 1,62$$

La banda morta può essere quindi espressa in volt:

$$\alpha_V = \alpha_{\%} \frac{V_n}{100} = 1,62 \frac{400 V}{100} = 6,48 V$$

Oltre alla banda morta  $\alpha$  viene tarata anche l'isteresi della banda morta  $\beta$ , che corrisponde ad una percentuale del 60% della banda morta e sarà quindi pari a:

$$\beta_V = \alpha_V \frac{60}{100} = 3,88 V$$

Questo ulteriore parametro permette al regolatore di tensione di discriminare se il valore di tensione di riferimento richiesto sia stato raggiunto e di gestire quindi i cambi di presa successivi sul VSC, al fine di implementare il nuovo set-point, facendo un ulteriore controllo rispetto alla tensione misurata.

Ulteriori cambi di presa consecutivi vengono quindi evitati usando una banda morta leggermente più stretta della già citata  $\alpha$ .

Se la differenza tra la nuova tensione misurata e la tensione da impostare risulta inferiore all'isteresi della banda morta, la regolazione è da ritenersi conclusa. In caso contrario il regolatore attuerà un cambio di presa successivo.

Riassumendo, le condizioni necessarie affinché il regolatore manovri correttamente il VSC per l'attuazione di un nuovo set-point di tensione sono le seguenti:

$$V_{MIS\_Step1} > V_{RIF} + \alpha_V \text{ oppure } V_{MIS\_Step1} < V_{RIF} - \alpha_V$$

$$V_{MIS\_Step2} < V_{RIF} + \beta_V \text{ oppure } V_{MIS\_Step2} > V_{RIF} - \beta_V$$

dove  $V_{RIF}$  è la tensione di set point da impostare mentre  $V_{MIS\_Step1}$  e  $V_{MIS\_Step2}$  sono rispettivamente le tensioni misurate in due istanti successivi.

Le due relazioni così espresse tengono inoltre conto sia degli innalzamenti di tensione sia degli abbassamenti di tensione, con le rispettive convenzioni di segno.

## 8. CONCLUSIONI

Le tecnologie Smart Grids definite sinora fanno sì che possano essere attuate delle tecniche di regolazione avanzate sulla rete di Media e Bassa Tensione, replicando quello che è lo stato dell'arte della tecnologia utilizzata anche sui trasformatori AT/MT.

Questo consente di evitare l'insorgere di violazioni non solo sulle linee di Media Tensione ma migliora la qualità della tensione di rete anche in prossimità dei clienti di Bassa Tensione, favorendo una sempre migliore qualità del servizio con un conseguente aumento della Hosting Capacity e consentendo al distributore di rispettare sempre determinati vincoli di sicurezza.

Questo è possibile impiegando una nuova generazione di dispositivi di telecontrollo, integrabile sia con i nuovi sistemi deputati alla stima dello stato della rete di Bassa Tensione ma anche capaci di effettuare calcoli elettrici per la propria rete di competenza.

In conclusione, le modalità di regolazione della tensione consentono di svolgere delle procedure di esercizio avanzate, che hanno come fine ultimo anche quello di aumentare la possibilità di connessione di nuovi produttori da fonti rinnovabili, connessi alla rete di distribuzione, che contribuiscono al consumo nazionale.