



## PTR 2022-2024 - Progetto 2.3

*Evoluzione, pianificazione, gestione ed esercizio delle reti elettriche*



Università  
degli Studi  
di Palermo

# ANALISI E APPLICAZIONI DI TECNOLOGIE MVDC PER LA RETE DI DISTRIBUZIONE IN MEDIA TENSIONE

03/12/2024

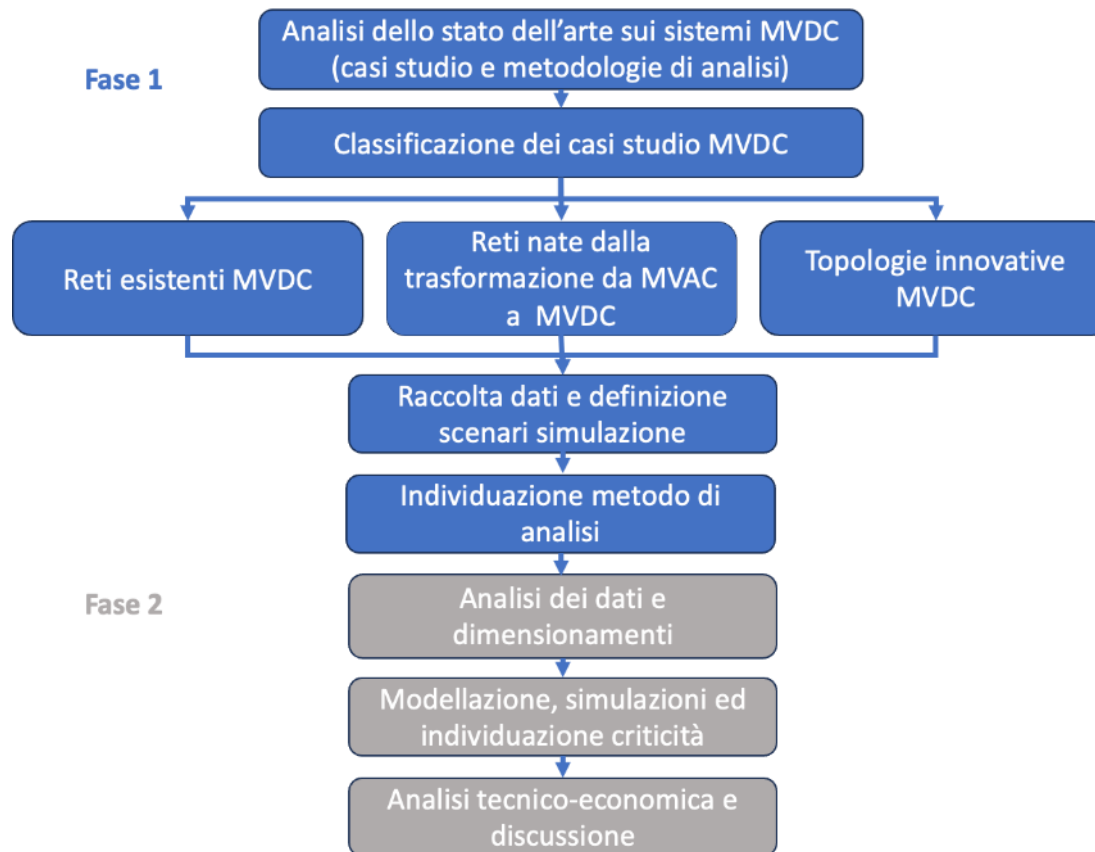
Eleonora Riva Sanseverino, Rossano Musca, Gaetano Zizzo  
Dipartimento di Ingegneria - Università degli Studi di Palermo

1101 0110 1100

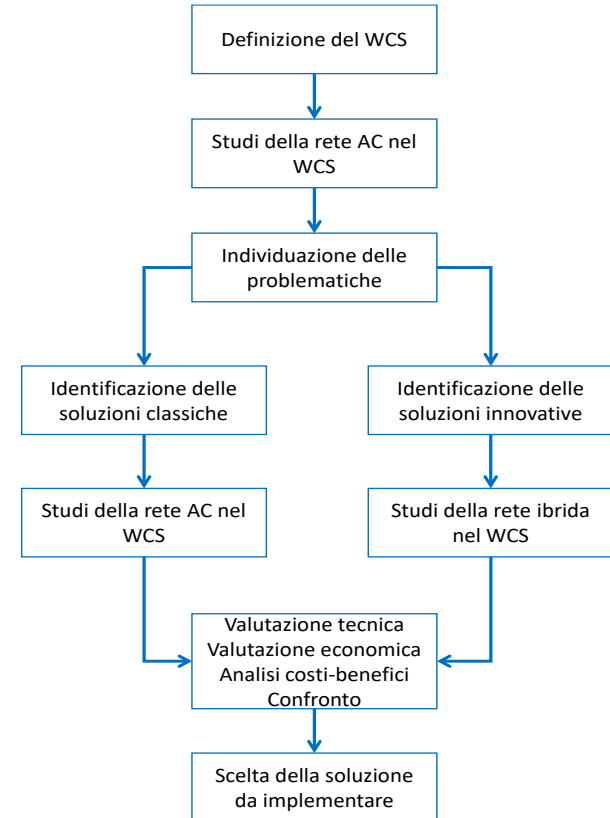
010 010 1101



- Definizione di una metodologia per l'individuazione di casi critici significativi che possano giustificare l'introduzione in una rete MVAC di connessioni MVDC.
- Individuazione di alcune strutture di rete/casi studio ritenuti più rilevanti per l'applicazione della metodologia.
- Applicazione della metodologia ai casi studio individuati.



- Individuazione di un *Worst Case Scenario* (WCS) per la rete AC esistente
- Analisi della rete esistente per verificarne il funzionamento nel WCS
- Individuazione delle problematiche della rete nel WCS
- Individuazione di soluzioni classiche che non prevedano conversioni in DC
- Analisi della rete dopo l'applicazione delle soluzioni classiche
- Individuazione di soluzioni che prevedono conversioni in MVDC
- Analisi della rete dopo l'applicazione delle soluzioni innovative
- Valutazione di indicatori tecnici ed economici e confronto
- Scelta della soluzione da implementare

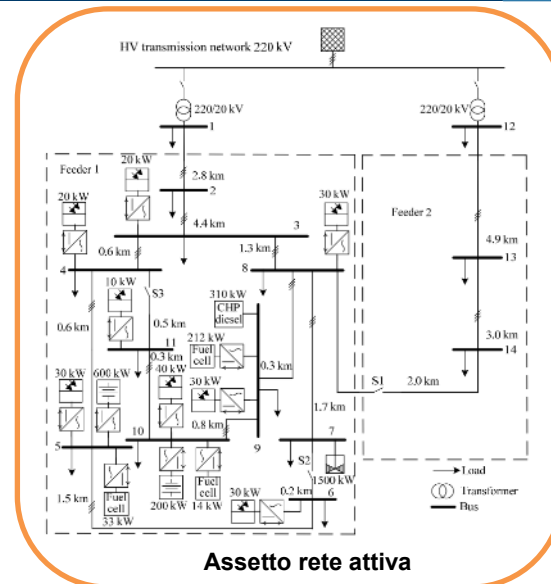
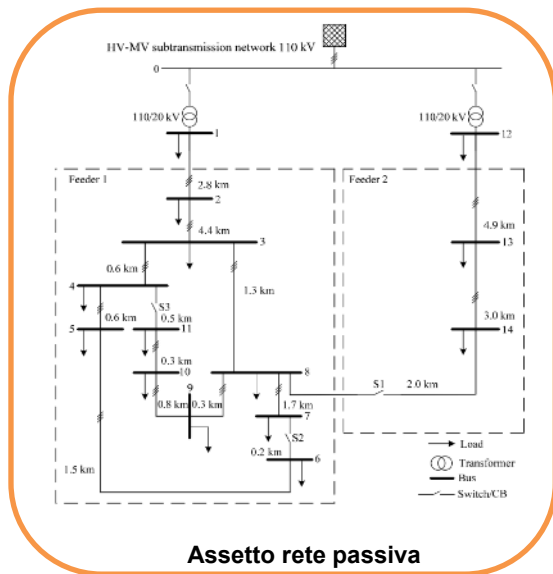


# SOLUZIONI CON USO DELLA DC



Problematica	Struttura di rete originaria	Soluzione innovativa proposta	Soluzione classica sostituita	Problematica	Struttura di rete originaria	Soluzione innovativa proposta	Soluzione classica sostituita
<p>Bassa potenza di cortocircuito della rete con conseguente incremento delle cadute di tensione, maggiore severità delle buche di tensione, distacco della generazione distribuita per l'intervento delle protezioni di interfaccia.</p> <p>Incremento della potenza di cortocircuito della rete con conseguente inadeguatezza delle protezioni contro le sovracorrenti.</p>		<p>Conversione in MVDC di una porzione di rete in MVAC</p> <p>Sostituzione di un trasformatore con una stazione di conversione AC/DC e trasformazione in DC della rete a valle.</p> <p>Installazione in un nodo di rete (B) di una stazione di conversione AC/DC e trasformazione in DC della rete a valle.</p>	<p>b) c) d)</p>	<p>Inversione del flusso di potenza in presenza di elevata generazione rinnovabile con creazione di area critica.</p> <p>Elevate cadute o sovrappressioni di tensione nella rete MT.</p> <p>Sovraccarico della rete MT.</p>		<p>Installazione di convertitori AC/DC in nodi lontani dalle stazioni AT/MT per realizzare una chiusura della rete con dei rami in DC</p>	<p>a) c) e)</p>
<p>Bassa potenza di cortocircuito della rete con conseguente incremento delle cadute di tensione, maggiore severità delle buche di tensione, distacco della generazione distribuita per l'intervento delle protezioni di interfaccia.</p> <p>Incremento della potenza di cortocircuito della rete con conseguente inadeguatezza delle protezioni contro le sovracorrenti.</p>		<p>Installazione di convertitori AC/DC in configurazione back-to-back per suddividere la rete AC in due sottoreti asincrone</p> <p>Sostituzione di un trasformatore con una stazione di conversione AC/DC-DC/AC.</p> <p>Installazione in un nodo di rete (B) di una stazione di conversione AC/DC-DC/AC.</p>	<p>b) c) d)</p>	<p>Elevate cadute o sovrappressioni di tensione nella rete MT.</p> <p>Sovraccarico della rete MT.</p> <p>Bassa potenza di cortocircuito della rete con conseguente incremento delle cadute di tensione, maggiore severità delle buche di tensione, distacco della generazione distribuita per l'intervento delle protezioni di interfaccia.</p>		<p>Realizzazione di collegamenti in DC in sostituzione di linee in AC</p>	<p>b) c)</p>
<p>Inversione del flusso di potenza in presenza di elevata generazione rinnovabile con creazione di area critica.</p> <p>Elevate variazioni di tensione alle sbarre MT di stazione.</p>		<p>Installazione di convertitori AC/DC presso le stazioni di trasformazione per realizzare collegamenti in banking in DC</p> <p>Realizzazione di un banking aperto in DC tra i secondari dei</p>	<p>a) e)</p>	<p>Note:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) riconfigurazione della rete AC;</li> <li>b) potenziamento di sezioni della rete AC con incremento della taglia dei trasformatori o delle sezioni delle linee in cavo o aeree;</li> <li>c) installazione di compensatori shunt (capacità o reattori) per la regolazione della tensione;</li> <li>d) adeguamento del potere di interruzione dei dispositivi di protezione;</li> <li>e) realizzazione di collegamenti in banking tra i trasformatori o, in generale, realizzazione di nuove maglie.</li> </ul>			

# RETI TEST: BENCHMARK CIGRE

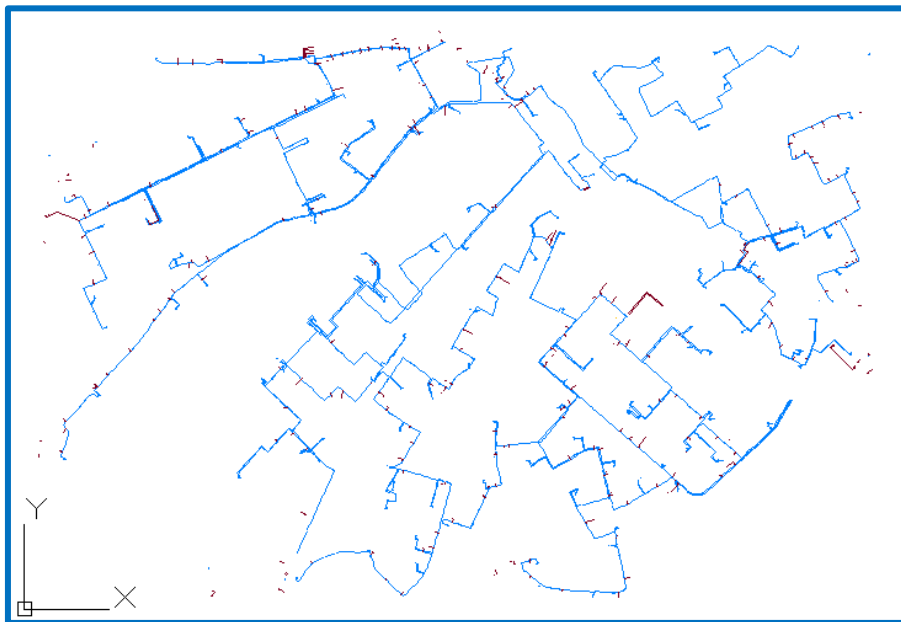


Ricavata da una rete MV del sud della Germania ed alimentante una piccola città e l'area rurale circostante.

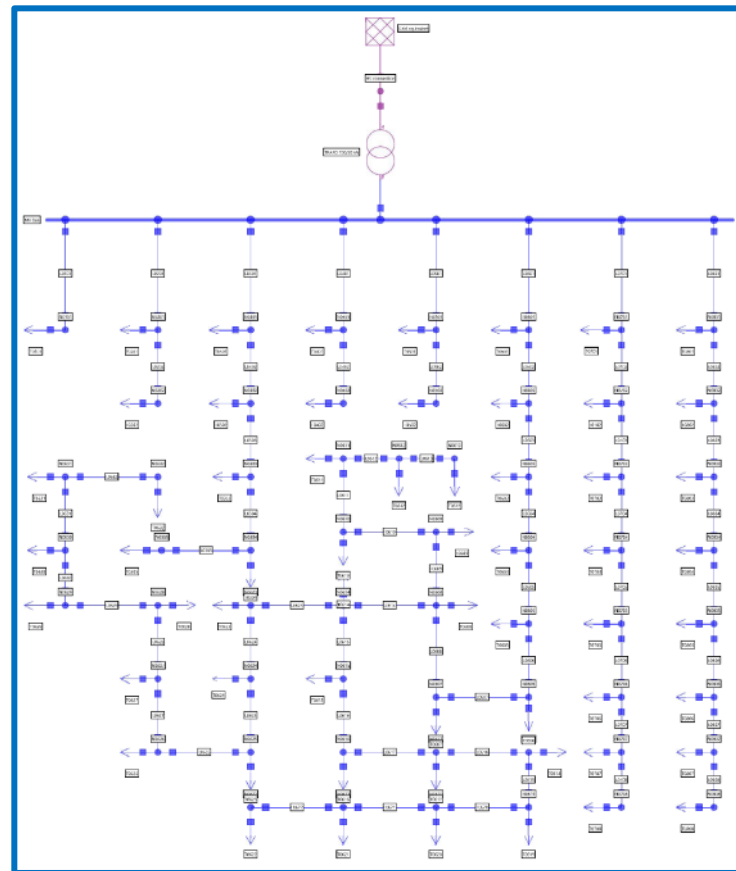
Rappresentativa delle reti fisiche MV tipiche del Nord America e dell'Europa.

Ampliamente utilizzata nella letteratura scientifica come rete test in diversi studi. Per tale motivo, è stata considerata ideale per testare la metodologia messa a punto prima della sua applicazione a due reti reali.

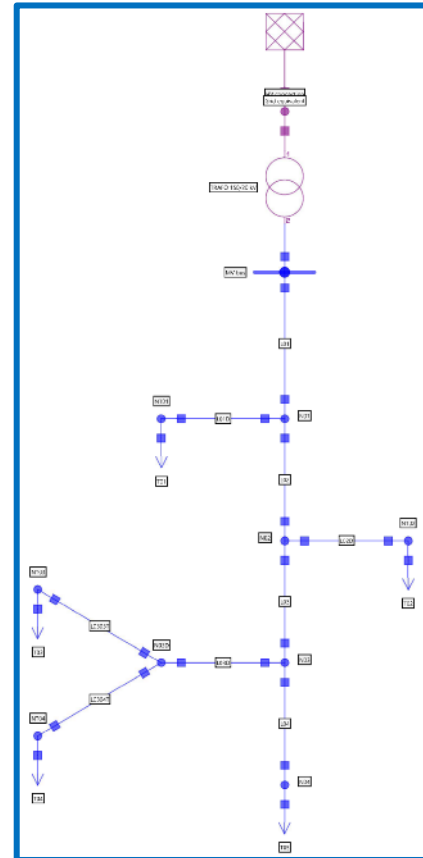
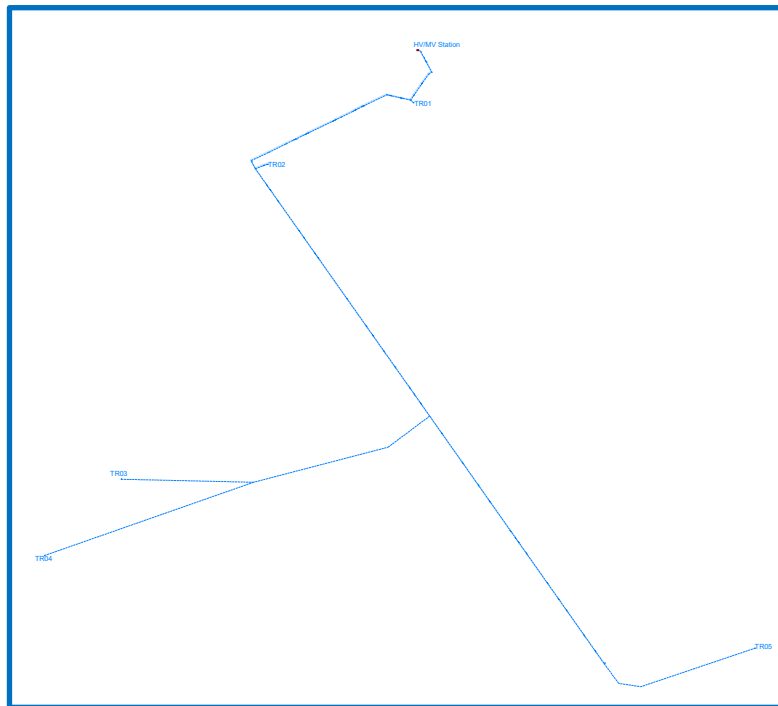
# RETI TEST: RETE URBANA



- Alimentata da un trasformatore 150/20 kV da 50 MVA
- Comprende 8 linee a 20 kV in cavo interrato in Al/Cu
- Alimenta 60 cabine di potenza variabile
- Utenti prevalentemente passivi ed energivori
- Alcune linee lavorano al limite di dimensionamento



- Alimentata da un trasformatore 150/20 kV da 25 MVA
- Comprende 4 linee a 20 kV miste aeree/in cavo
- Una linea alimenta utenze rurali: 5 utenze di piccola potenza
- Grandi distanze tra i nodi e rischio di innalzamento di tensione o di inversione di flusso alla cabina primaria in seguito all'installazione di FV

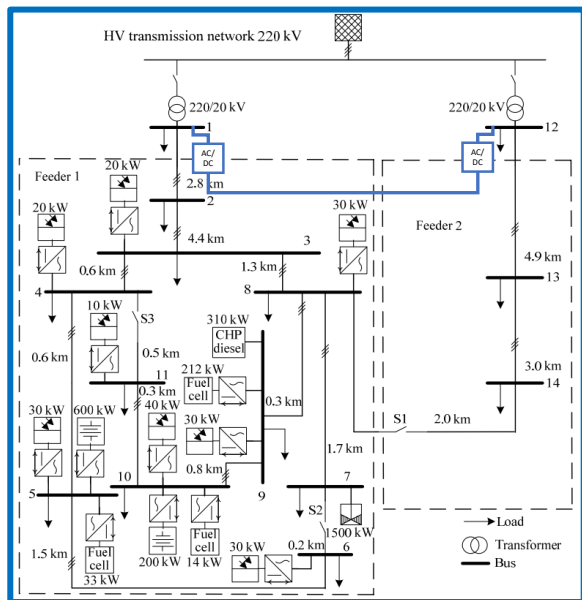


# CASO STUDIO RETE BENCHMARK

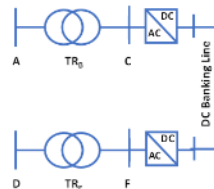


Il WCS della rete consiste nell'inversione del flusso di potenza al trasformatore di sinistra della rete per un tempo tale che si configuri un'area critica.

Dalla tabella operativa si individua la soluzione sotto riportata.



Installazione di convertitori AC/DC presso le stazioni di trasformazione per realizzare collegamenti in banking in DC:



Realizzazione di un banking aperto in DC tra i secondari dei trasformatori 11V/MV o MV/MV della rete.

## Benefici

Eliminazione dell'area critica con conseguente incremento di potenza installabile da rinnovabile.

Regolazione dei flussi di potenza attraverso i trasformatori per consentire un migliore utilizzo ed evitare sovraccarichi in caso di carico elevato.

Fornitura di servizi di regolazione di frequenza: regolazione primaria veloce o inerzia sintetica.

Regolazione più efficace della potenza reattiva e della tensione alle sbarre della sottostazione. Minori tempi per la connessione degli impianti di generazione rinnovabile.

Evitamento di opere di potenziamento in AC. Riduzione dei costi per la collettività associati alle externalità.

## Costi

Realizzazione di due stazioni di conversione AC/DC.

Realizzazione di una nuova linea in DC.

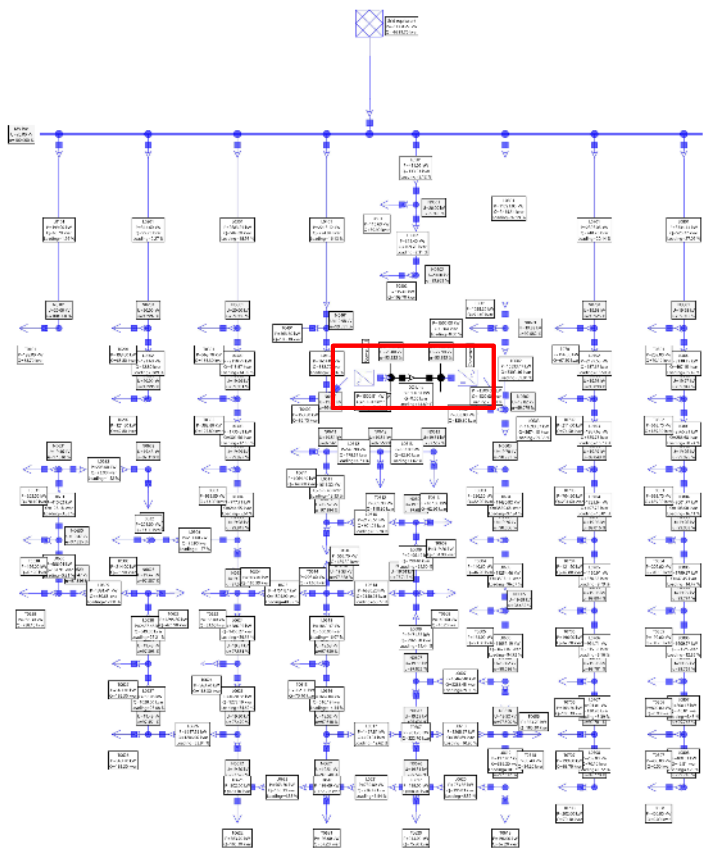
Complicazione del layout della rete di distribuzione.

Introduzione di nuovi componenti con incremento del rischio di guasto.

Realizzazione di un sistema di controllo coordinato per i due convertitori.

Perdite di conversione.

# CASO STUDIO RETE URBANA



Il WCS della rete consiste nel sovraccarico dei due tratti iniziali delle linee più lunga. Si opera una conversione da alternata a continua. Si collegano due linee attraverso una nuova struttura in MVDC che regoli i flussi di potenza nella linea in sovraccarico.

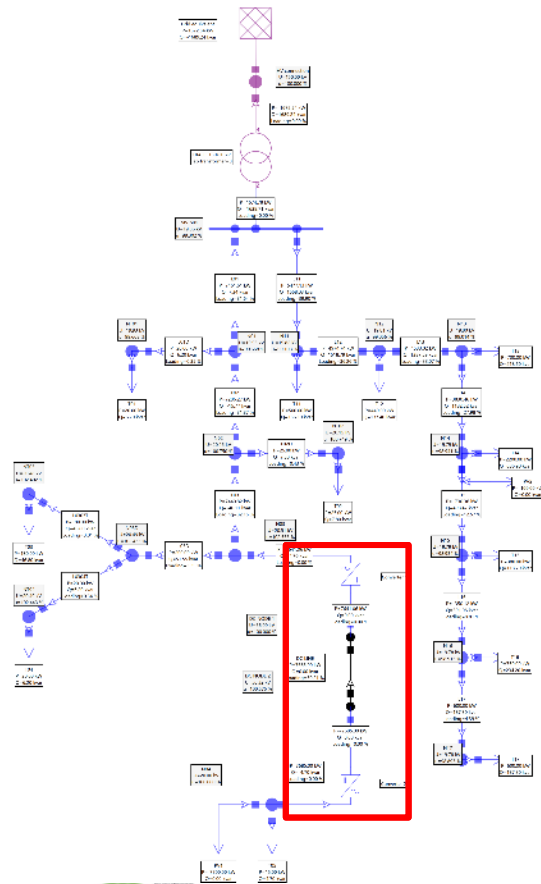
Benefici	Costi
<p>Fornitura di servizi di regolazione di frequenza: regolazione primaria veloce o inerzia sintetica.</p> <p>Regolazione più efficace della potenza reattiva e della tensione nella linea in cui si opera la conversione.</p> <p>Evitamento di opere di potenziamento della linea in AC e di scavi all'interno del centro urbano.</p>	<p>Realizzazione di due stazioni di conversione AC/DC.</p> <p>Complicazione del layout della rete di distribuzione.</p> <p>Introduzione di nuovi componenti con incremento del rischio di guasto.</p> <p>Realizzazione di un sistema di controllo coordinato per i due convertitori.</p> <p>Perdite di conversione.</p>

# CASO STUDIO RETE RURALE



Il WCS della rete consiste nel sovraccarico e nella sopraelevazione di tensione nel tratto terminale della linea in alternata alimentante un impianto fotovoltaico nell'area rurale.

Si trasforma una linea AC in DC.



Benefici	Costi
Fornitura di servizi di regolazione di frequenza: regolazione primaria veloce o inerzia sintetica.	Realizzazione di due stazioni di conversione AC/DC.
Regolazione più efficace della potenza reattiva e della tensione nella linea in cui si opera la conversione.	Complicazione del layout della rete di distribuzione.
Evitamento di opere di potenziamento della linea in AC e di scavi all'interno del centro urbano.	Introduzione di nuovi componenti con incremento del rischio di guasto.
	Realizzazione di un sistema di controllo coordinato per i due convertitori.
	Perdite di conversione.

# ANALISI ECONOMICA



$$C_{INS} = \sum_{i=1}^l c_{n,i} \cdot N_i + \sum_{i=1}^m c_{a,i} \cdot A_i + \sum_{i=1}^n c_{e,i} \cdot E_i + \sum_{i=1}^r c_{l,i} \cdot L_i$$

- $l$  è il numero di componenti del sistema realizzato il cui costo unitario è espresso in €/cad;
- $m$  è il numero di componenti del sistema realizzato il cui costo unitario è espresso in €/kW, €/kVA o €/kVAR;
- $n$  è il numero di componenti del sistema realizzato il cui costo unitario è espresso in €/kWh;
- $r$  è il numero di componenti del sistema realizzato il cui costo unitario è espresso in €/km;
- $c_{n,i}$  è il costo unitario in €/cadauno dell' $i$ -esimo componente installato;
- $c_{a,i}$  è il costo unitario in €/kW, €/kVA o €/kVAR dell' $i$ -esimo componente installato;
- $c_{e,i}$  è il costo unitario in €/kWh dell' $i$ -esimo componente installato;
- $c_{l,i}$  è il costo unitario in €/km dell' $i$ -esimo componente installato;
- $N_i$  è il numero di unità installate dell' $i$ -esimo componente di impianto;
- $A_i$  è la potenza nominale dell' $i$ -esimo componente installato;
- $E_i$  è la capacità nominale in kWh (MWh) dell' $i$ -esimo componente installato;
- $L_i$  è la lunghezza dell' $i$ -esimo componente installato;

Descrizione dell'opera	Costo unitario (€)	Unità di misura
Trasformatore AT/MT 16 MVA	350000	cadauno
Trasformatore AT/MT 25 MVA	450000	cadauno
Trasformatore AT/MT 40 MVA	540000	cadauno
Trasformatore AT/MT 63 MVA	700000	cadauno
Trasformatore MT/BT 250 kVA	5000	cadauno
Trasformatore MT/BT 400 kVA	6000	cadauno
Trasformatore MT/BT 630 kVA	8400	cadauno
Stazione di conversione MVDC	45000	MVA
Stallo in stazione (Un fino a 150 kV)	315000	cadauno
Stallo in stazione (Un = 220 kV)	370000	cadauno
Cabina primaria con TRAF0 16 MVA 150/20 kV/kV	4000000	cadauno
Cabina primaria con TRAF0 25 MVA 150/20 kV/kV	4200000	cadauno
Cabina primaria con TRAF0 40 MVA 150/20 kV/kV	4700000	cadauno
Cabina primaria con TRAF0 16 MVA 220/20 kV/kV	4200000	cadauno
Cabina primaria con TRAF0 25 MVA 220/20 kV/kV	4400000	cadauno
Cabina primaria con TRAF0 40 MVA 220/20 kV/kV	5000000	cadauno
Linea aerea AT singola terna fino a 150 kV	300000	km
Linea aerea AT singola terna a 220 kV	250000	km
Linea aerea AT doppia terna fino a 220 kV	400000	km
Linea in cavo Al 3x1x1600 mm <sup>2</sup> fino a 150 kV	2000000	km
Linea in cavo Al 3x1x1600 mm <sup>2</sup> a 220 kV	2500000	km
Bobina di Petersen fissa	20000	cadauno
Bobina di Petersen mobile	65000	cadauno
Stallo MT	25000	cadauno
Linea MT in cavo aereo Al 35 mm <sup>2</sup>	45000	km
Linea MT in cavo aereo Al 50 mm <sup>2</sup>	48000	km
Linea MT in cavo aereo Al 95 mm <sup>2</sup>	50000	km
Linea MT in cavo aereo Al 150 mm <sup>2</sup>	60000	km
Linea MT doppia terna in cavo aereo Al fino 50 mm <sup>2</sup>	75000	km
Linea MT doppia terna in cavo aereo Al 95 mm <sup>2</sup>	90000	km
Linea MT doppia terna in cavo aereo Al 150 mm <sup>2</sup>	95000	km
Linea in cavo sotterraneo Al 185 mm <sup>2</sup> (valore medio)	100000	km
Linea in cavo sotterraneo Al 240 mm <sup>2</sup> (valore medio)	110000	km
Linea in cavo sotterraneo Cu 240 mm <sup>2</sup> (valore medio)	225000	km
Cabina di sezionamento	22500	cadauno
Allestimento cabina di consegna in entra-esce	7500	cadauno
Condensatori	65000	MVAR

Caso studio	$C_{DC}$ : Costo soluzione con uso di DC [€]	$C_{AC}$ : Costo soluzione classica [€]	$C_{DC}/C_{AC}$
Rete benchmark - Conversione linea da AC in DC	2.260.000 €	482.000 €	4,69
Rete benchmark – Banking	1.470.000 €	530.000 €	2,77
Rete urbana – Conversione linea da AC a DC	1.310.000 €	119.720 €	10,94
Rete urbana – Realizzazione collegamento tra i nodi	387.300 €	119.720 €	3,24
Rete rurale/industriale -	1.850.000 €	302.000 €	6,13

- L'evoluzione del carico e/o della generazione distribuita possono portare alla nascita di alcune problematiche tecniche nelle reti di distribuzione che necessitano di interventi di potenziamento o di trasformazione delle stesse reti.
- Le reti mostrano dei comportamenti molto diversi tra loro a causa delle differenti topologie, delle differenti tipologie e percentuali di carico e di generazione, della collocazione delle generazione rispetto al carico.
- L'integrazione della tecnologia in DC nelle reti AC esistenti può contribuire a risolvere queste problematiche.
- Nei casi esaminati, le soluzioni che fanno uso della tecnologia in DC risultano sempre tra le 3 e le 11 volte più costose rispetto a quelle tradizionali.
- L'esperienza con la rete urbana ci mostra come una scelta attenta tra le diverse soluzioni che fanno uso della DC consente di ottenere uno stesso risultato con un costo decisamente minore rispetto a quello che si avrebbe con un'altra soluzione.

- Nonostante alcuni progetti esistenti di reti MVDC, non esistono ancora standard relativi a MVDC unificati e affidabili.
- Nonostante alcuni confronti riscontrabili in letteratura, non esiste ancora una metodologia per stabilire quando è opportuno utilizzare strutture in DC al posto di strutture in AC in reti MV.
- I vantaggi di sistema derivanti dall'implementazione delle reti MVDC variano a seconda delle diverse applicazioni.
- Per le applicazioni dei sistemi di distribuzione delle utility, i principali vantaggi sono l'elevata capacità di alimentazione dei circuiti DC, la flessibilità del controllo del flusso di potenza e la maggiore penetrazione di DER consentita, mentre i principali vantaggi per l'elettrificazione industriale e l'integrazione delle fonti rinnovabili sono la riduzione degli investimenti e/o l'aumento dell'efficienza.
- La rete MVAC e la rete MVDC coesisteranno per molto tempo nei futuri sistemi di distribuzione dell'energia.
- I fondamenti e le tecnologie chiave per le reti MVDC richiedono uno studio continuo, dettagliato e approfondito.



Grazie per l'attenzione!



Gaetano Zizzo: [gaetano.zizzo@unipa.it](mailto:gaetano.zizzo@unipa.it)

Questo lavoro è stato finanziato dal Fondo di Ricerca per il Sistema Elettrico nell'ambito del Piano Triennale 2022-2024 (DM MITE n. 337, 15.09.2022), in ottemperanza al DM 16 aprile 2018"