

# **CAPITOLO 15**

## **SERVIZIO ELETTRICO**

# IL PROBLEMA

Fornire energia sotto forma di elettricità ad utenze disperse all'interno del lay-out di impianto.

Il servizio deve:

- erogare la potenza necessaria nel tempo, tenuto conto che non è accumulabile (tranne casi particolari);
- far fronte alle esigenze di utenze molto diverse (fem, illuminazione, ecc.).

Le problematiche sono del tutto simili a quelle già riscontrate per i servizi di riscaldamento, raffreddamento e distribuzione del gas.

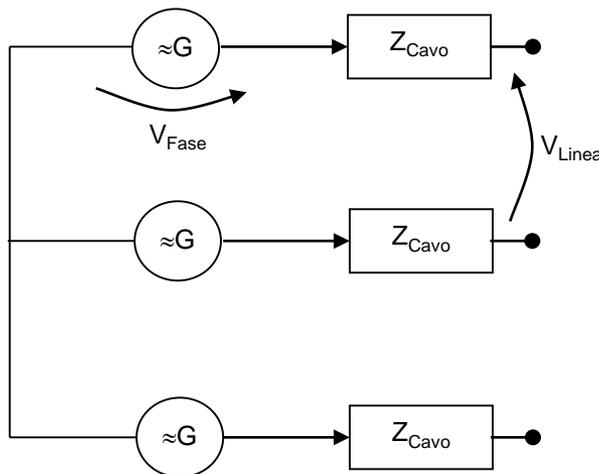
# ARGOMENTI TRATTATI

- Richiami di elettrotecnica;
- Il progetto d'impianto;
- La struttura dei costi.

# ELETTROTECNICA

Verranno considerati sistemi caratterizzati da:

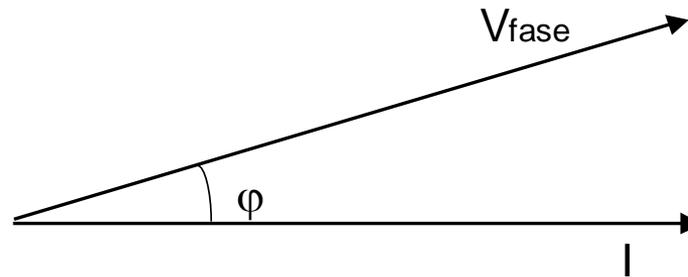
- Corrente sinusoidale alternata
- Simmetrici: le tensioni sono uguali e ugualmente sfasate:  $V_{F1} = V_{F2} = V_{F3}$
- Equilibrati: le correnti sono uguali e ugualmente sfasate:  $I_{F1} = I_{F2} = I_{F3}$
- Sfasamenti uguali:  $120^\circ$



$$V_{Linea} = \sqrt{3} \cdot V_{Fase}$$

Collegamento a stella

# ELETTROTECNICA



CASO INDUTTIVO

Grandezza	Simbolo	Serie	Parallelo
Resistenza	R	$R = \sum_i R_i$	$R = 1 / ( \sum_i R_i )$
Induttanza	L	$L = \sum_i L_i$	$L = 1 / ( \sum_i L_i )$
Capacità	C	$C = 1 / ( \sum_i C_i )$	$C = \sum_i C_i$
Reattanza	X	$X = L + C ( C < 0 )$	
Impedenza	Z	$Z = \sqrt{ R^2 + X^2 }$	

Tensione in anticipo su corrente

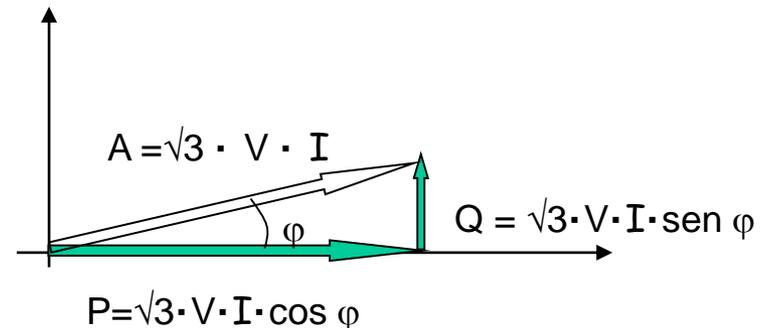
Tensione in ritardo su corrente

# ELETTROTECNICA

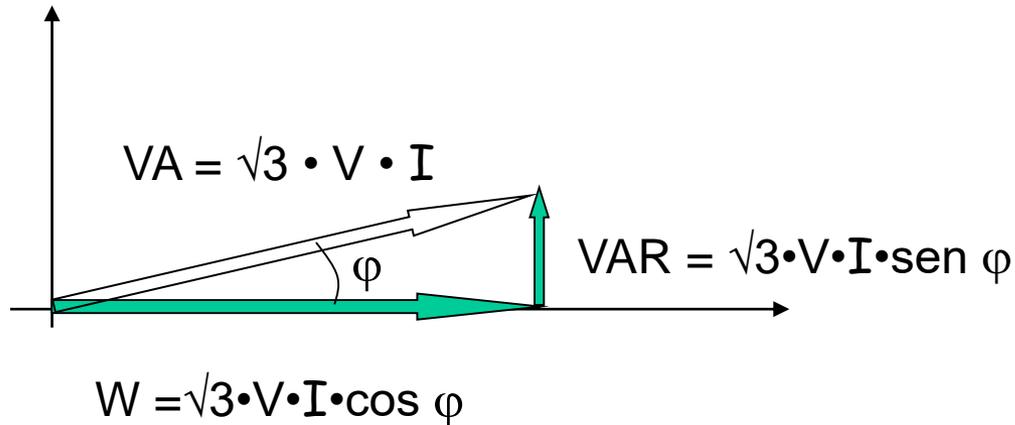
La potenza si divide in:

- Apparente (A): è la potenza totale disponibile per l'esecuzione di lavoro meccanico e la generazione di campi elettromagnetici;
  - Attiva (P): è la potenza disponibile per compiere un effetto utile (lavoro meccanico, come per es. generare coppia in un motore, oppure produrre calore, come per es. generare calore in una resistenza);
  - Reattiva (Q): è la potenza disponibile per generare i campi elettromagnetici necessari alle macchine (es. campi statorici in una macchina).
- La potenza A trasportata da una singola fase è pari a:  $A_F = V_F \cdot I$ ;
  - La potenza totale è  $A = 3 \cdot A_F = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot A_F = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot V_F \cdot I$

$$A = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I$$



# ELETTROTECNICA



Relazione	U.M.	Corrente alternata		Corrente continua
		Trifase	Monofase	
Legge di Ohm		$V_F = Z \cdot I$	$V_F = Z \cdot I$	$V = R \cdot I$
Potenza Attiva	W	$P = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I \cdot \cos \varphi$	$P = V_F \cdot I \cdot \cos \varphi$	$P = V \cdot I$
Potenza Reattiva	VAR	$Q = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I \cdot \sin \varphi$	$Q = V_F \cdot I \cdot \sin \varphi$	
Potenza Apparente	VA	$A = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I$	$A = V \cdot I$	
Energia attiva	kWh	P · tempo utilizzo	P · tempo utilizzo	P · tempo utilizzo

# ELETTROTECNICA

- simbologia

Simbolo	Spiegazione	Simbolo	Spiegazione
	Interruttore automatico relé a massima corrente		Presa bipolare
	Relé (in genere)		Presa tripolare
	Relé di massima		Centrale termoelettrica
	Relé a tempo indipendente		Centrale idroelettrica
	Accumulatore		Cabina elettrica
	Raddrizzatore in genere		Cabina di sezionamento
	Generatore in corrente continua		Cabina di trasformazione
	Generatore in corrente alternata		Centrale di pompaggio per accumulazione
	Motore elettrico generico		

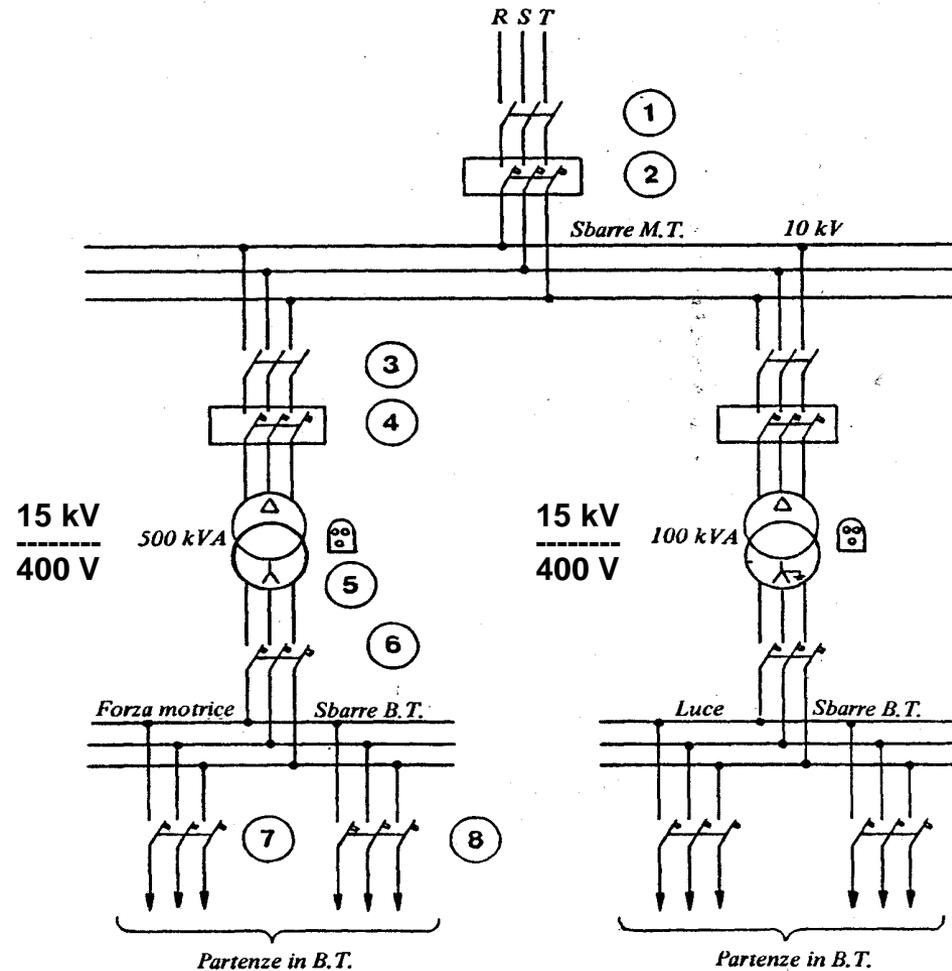
# ELETTROTECNICA

- simbologia

Simbolo	Spiegazione	Simbolo	Spiegazione
—	Corrente continua		Motore elettrico in corrente continua
~	Corrente alternata		Motore asincrono trifase
	Resistenza		Motore sincrono trifase
	Induttanza		Trasformatore di corrente
	Capacità		Trasformatore di tensione
	Collegamento di terra		Trasformatore trifase
	Fusibile		Trasformatore monofase
	Sezionatore per manovra in tensione, non sotto carico		Contattore
	Interruttore in genere (in aria o in olio)		Lampada di segnalazione

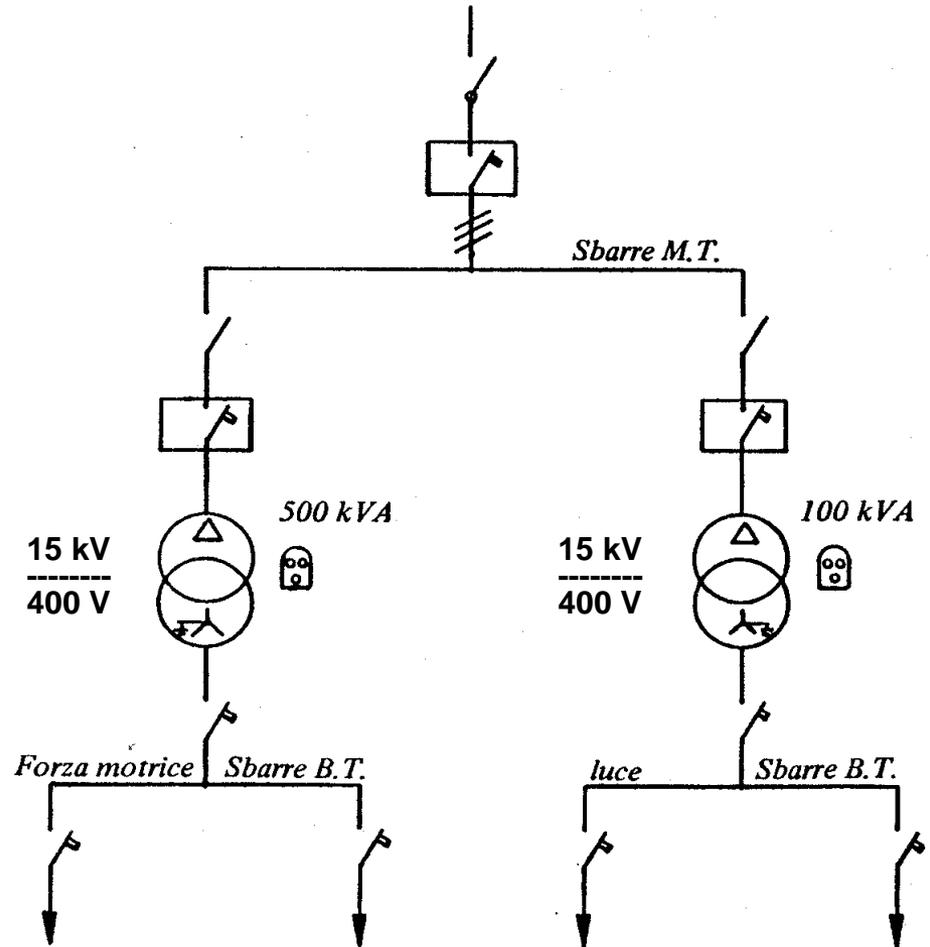
# ELETTROTECNICA

## Schema elettrico multifilare



# ELETTROTECNICA

Schema elettrico  
unifilare



# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

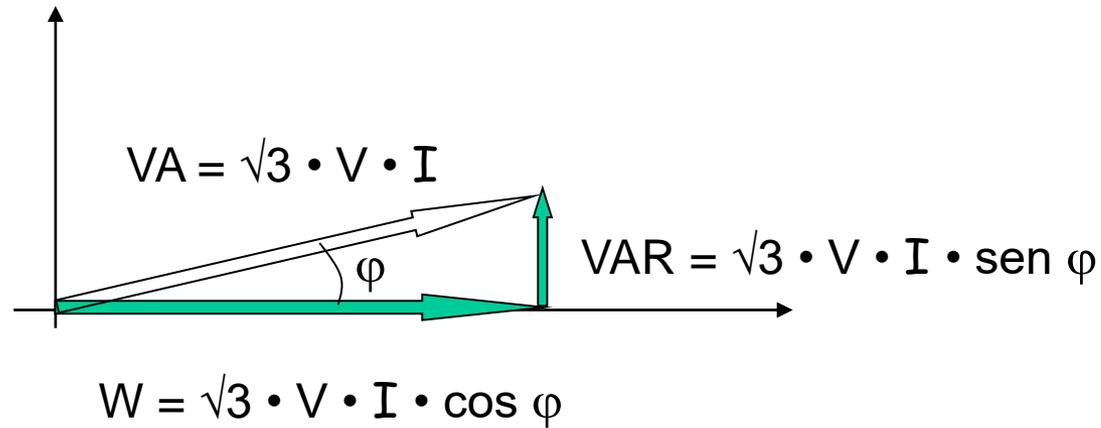
Passi da seguire:

- Acquisizione lay-out impianto;
- Determinazione caratteristiche dell'utenza;
- Valutazione coefficienti di contemporaneità e di utilizzo;
- Determinazione della potenza massima contemporanea;
- Scelta dello schema di distribuzione;
- Scelta dei componenti di dettaglio;
- Verifiche tecniche:
  - Caduta di tensione;
  - Verifica Termica;
  - Corrente di corto circuito;
  - Verifica contro rischio di folgorazione;
  - Fattore di potenza.

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Caratteristiche dell'utenza

- Numero e tipologia di utenze (macchine, condizionatori, illuminazione, impianti di trattamento);
- Profilo temporale di utilizzo delle macchine;
- Tensione e frequenza di alimentazione (legati ad altri parametri quali la potenza installata);
- Fattore di potenza ( $\cos \varphi$ ).



# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Coefficienti di contemporaneità ed utilizzo

Considerare come fabbisogno di potenza da soddisfare la somma delle potenze nominali è eccessivo, perché:

- Non sempre le macchine sono usate al massimo della loro potenzialità: si introduce il **fattore di utilizzo** (coeff.  $\in [0,1]$ );
- Non sempre i picchi di una macchina coincidono “istantaneamente” con i picchi delle altre: si introduce il **fattore di contemporaneità** (coeff.  $\in [0,1]$ ).

Questi coefficienti possono essere ricavati per via empirico- statistica, o facendo ricorso a tabelle “tipiche” di settore.

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Scelta delle tensioni del sistema

La scelta della tensione di alimentazione dipende dalla potenza delle macchine, perchè al crescere della potenza, e a pari tensione:

- Cresce linearmente la corrente in gioco
- Conseguentemente crescono con legge quadratica le perdite di energia per effetto joule ( $P=RI^2$ );

Pertanto, aumentando le tensioni di alimentazione:

- Si riducono i costi di esercizio;
- Cresce il costo di impianto di isolamenti, apparecchiature di controllo, ma si riduce quello del rame.

Inoltre, la tensione di alimentazione va scelta anche in modo da evitare di avere un numero eccessivo di tensioni diverse.

Potenza fino a:	Tensione di alimentazione (V)	
	teorica	reale
250-300 kW	400	400
300-500 kW	700	400 - 6.000
500-1.000 kW	3.000 – 5.000	6.000
oltre 1.000 kW	oltre 10.000	6.000 - 15.000 - 20.000

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Distribuzione dell'energia

Solitamente l'energia elettrica per scopi industriali viene fornita in media tensione (es. 20 kV), forma sotto cui non è direttamente utilizzabile. Si deve quindi trattare tale energia:

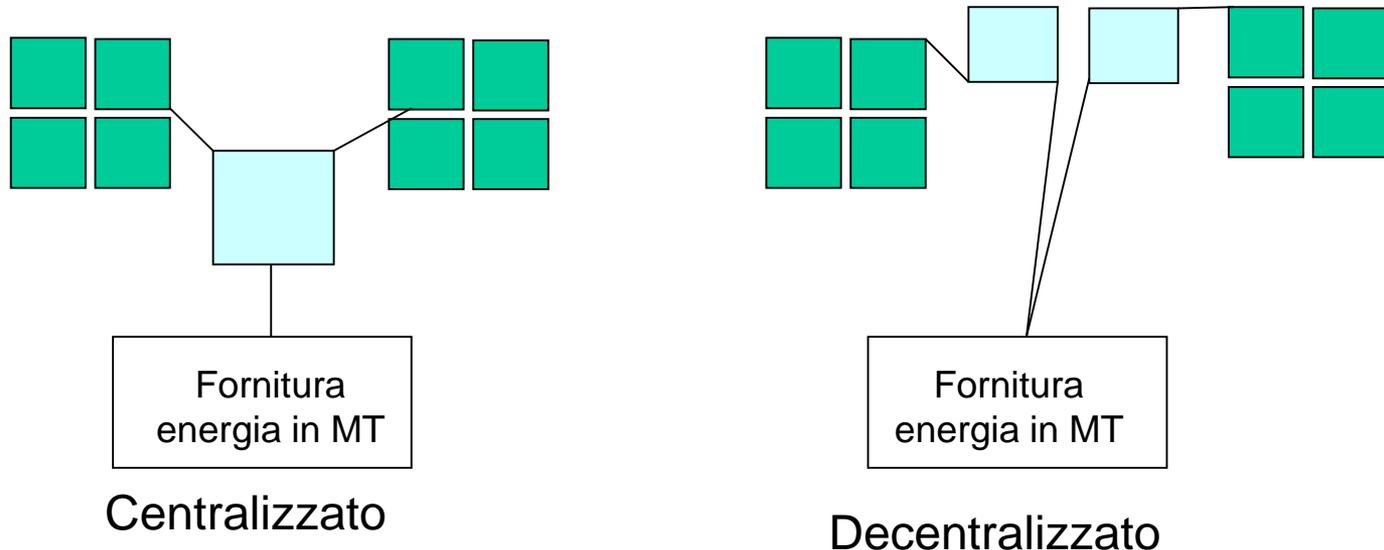
- Distribuzione primaria:
  - Come trasformare la tensione di fornitura;
  - Quante cabine di trasformazione posizionare;
  - Dove posizionarle rispetto ai carichi;
  - Come collegarle tra di loro;
- Distribuzione secondaria:
  - Come effettuare il collegamento tra utenze e cabine di trasformazione.

Il complesso di queste scelte è basato su considerazioni tecnico/economiche.

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Distribuzione primaria: dimensionamento delle cabine di trasformazione.

E' una classica scelta di centralizzazione / decentralizzazione.



Al crescere del grado di centralizzazione, cresce la potenza che deve assicurare la cabina di trasformazione. Di conseguenza, i costi di impianto e di esercizio si modificano come indicato a seguire.

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Distribuzione primaria: dim. cabine di trasformazione

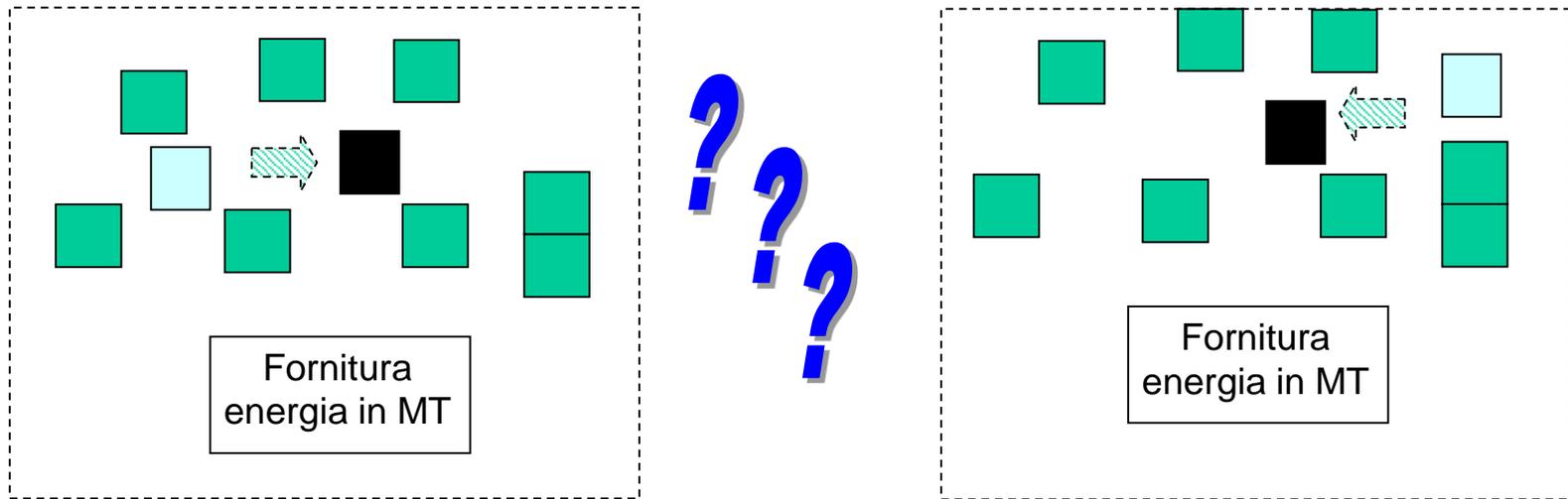
Fattore	Al crescere della potenza del trasformatore:		
	Causa	Effetto	Spinge a
<b>Costo del trasformatore</b>	tecnologia di realizzazione	crece meno che proporzionalmente alla pot. Installata ...	<b>Centralizzare</b>
<b>Costo di impianto delle linee di distribuzione</b>	maggior utilizzo di cavi BT, maggiori correnti	maggiore costo dei cavi.	<b>Decentralizzare</b>
<b>Costo di esercizio delle linee di distribuzione</b>	maggior utilizzo di cavi BT, maggiori correnti	maggiori perdite per effetto joule ( $\approx I^2$ )	<b>Decentralizzare</b>
<b>Costo impianti di protezione (interruttori anti-corto circuito)</b>	crece la loro cura costruttiva, e se ne riduce l'impedenza	in caso di corto circuito, si generano correnti più elevate ( $V=RI$ ), con costi maggiori per l'impianto di protezione.	<b>Decentralizzare</b>

LA SOLUZIONE DI OTTIMO ECONOMICO (NUMERO DI CABINE, NUMERO E POTENZA DEI TRASFORMATORI, ECC.) DIPENDE DAI DATI DEL PROBLEMA (POTENZA MASSIMA, FORMA E SUPERFICIE DEL BACINO D'UTENZA, ECC).

NON ESISTE UNA REGOLA FISSA

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Distribuzione primaria: localizzazione delle cabine



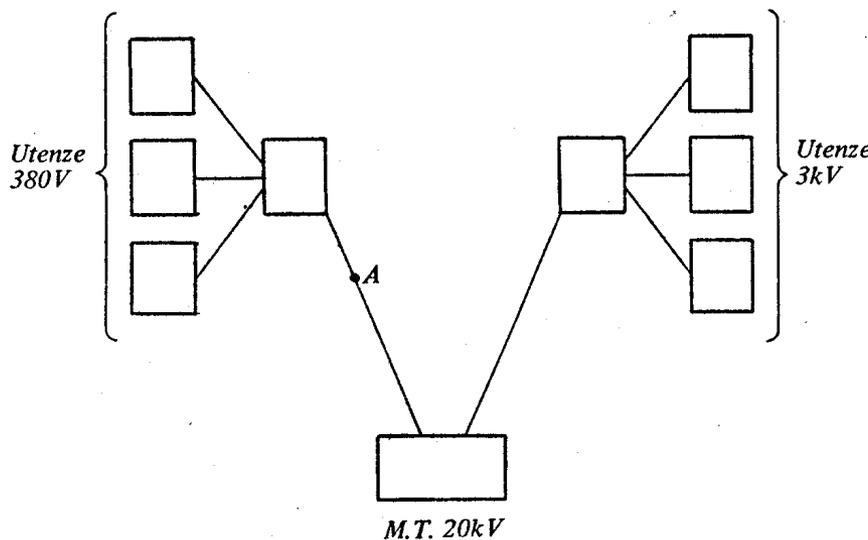
Si dimostra che, nel caso di utenze con impegno di potenza non dissimile tra loro, il costo minimo di distribuzione (impianto + esercizio) si ha posizionando la cabina nel baricentro dei carichi.

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

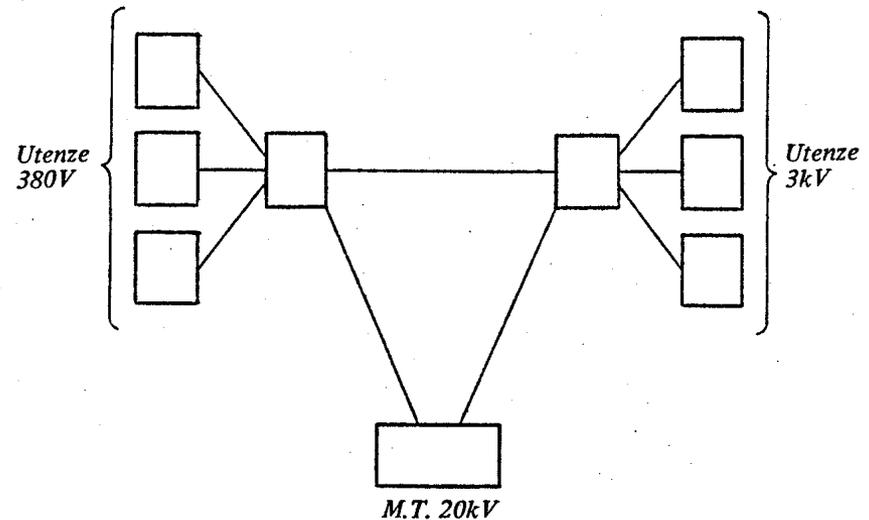
## Distribuzione primaria: collegamento cabine

I due schemi di collegamento tipici da prendere in considerazione sono: **Radiale** e **ad Anello**.

Nei casi più complessi, sono ovviamente possibili delle soluzioni miste.



Radiale



ad Anello

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Distribuzione primaria: collegamento cabine

Fattore	Radiale	Ad Anello	Rende preferibile	Note
<b>Semplicità dei collegamenti</b>	maggiore		Radiale	
<b>Costo di impianto</b>		maggiore	Radiale	Nel collegamento ad Anello, i singoli rami sono dimensionati per sopportare tutti i carichi
<b>Costo di esercizio</b>	maggiore		Anello	Per quanto sopra, nel collegamento ad Anello vi sono perdite minori
<b>Disponibilità</b>		maggiore	Anello	

Considerazioni di tipo economico guideranno questa scelta. Le stesse considerazioni si estendono al collegamento tra cabine ed utenze (distribuzione secondaria).

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Scelta dei componenti di dettaglio: CAVI

La fase di scelta dei componenti di dettaglio richiede una grande competenza tecnica: ai fini del presente corso si tengano presenti le seguenti indicazioni:

- Densità di corrente consigliata all'interno di un conduttore in rame: 2-4 A/mm<sup>2</sup>;
- Scelta di cavi adatti a:
  - Sollecitazioni meccaniche (trazione, torsione);
  - Condizioni ambientali (umidità, temperatura);
  - Caratteristiche chimico-fisiche dell'ambiente (agenti aggressivi, presenza di agenti infiammabili come idrocarburi, ecc.);
  - Tipo di posa (interrata, in canalina, ecc.).

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

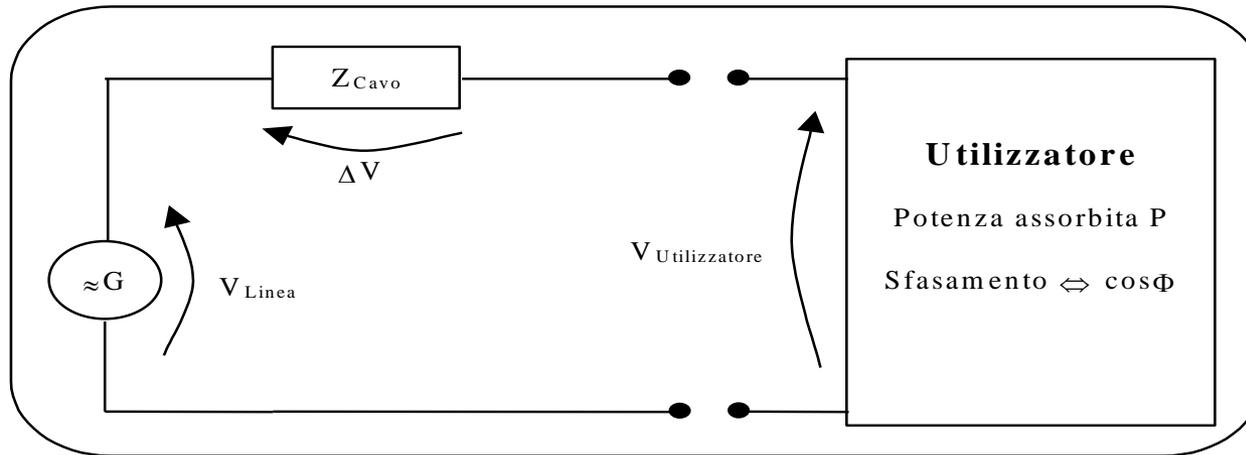
## Verifica alla caduta di tensione

Qualsiasi conduttore presenta una resistenza diversa da 0, per cui la tensione alla cabina di alimentazione è superiore alla tensione all'utenza. In funzione della tipologia di utenze, è necessario verificare che la caduta di tensione non oltrepassi i limiti ammessi per il corretto funzionamento delle apparecchiature:

- $\Delta V_{\max} = 3-4 \%$  per alimentazione di impianti di illuminazione;
- $\Delta V_{\max} = 6-7 \%$  per alimentazione di impianti di forza motrice.

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Verifica alla caduta di tensione



La caduta di tensione si calcola da:

$$\Delta V = \sqrt{3} \cdot Z \cdot I = \sqrt{3} \cdot \sqrt{R^2 + X^2} \cdot I$$

$V = V_l =$  tensione della linea  $= \sqrt{3} \cdot V_f$  ( $V_f =$  tensione di fase)

$I =$  corrente di linea (= corrente di fase)

$R, X =$  resistenza e reattanza della linea (= resistenza e reattanza di fase)

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Verifica alla caduta di tensione

Procedura:

- Stimare la corrente nominale che circola nella linea:

$$P = \sqrt{3} (V - \Delta V_{\max}) I \cos \varphi \quad \rightarrow \text{trovo } I$$

- Scegliere un cavo con densità di corrente 2 - 4 A/mm<sup>2</sup>;
- Ricavare, tramite le tabelle caratteristiche del cavo, la resistenza (r) e la reattanza (x) specifiche (Ohm/km);
- Nota la lunghezza del cavo, calcolare R e X;
- Applicare  $\Delta V = \sqrt{3} \cdot Z \cdot I = \sqrt{3} \cdot \sqrt{R^2 + X^2} \cdot I$  e verificare se i vincoli sono rispettati.

In caso negativo, si incrementi la sezione del cavo: si sosterranno costi di impianto superiori, che consentiranno una diminuzione dei costi di esercizio.

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Verifica termica

Per effetto Joule, la corrente che attraversa un conduttore disperde potenza secondo la ben nota legge  $P=RI^2$ , determinando l'innalzamento di temperatura del cavo stesso.

La verifica termica impone che la differenza di temperatura  $\Delta T$  tra cavo ed ambiente circostante non superi un valore tale da provocare la fusione della guaina di isolamento.

Empiricamente si usa la seguente espressione:

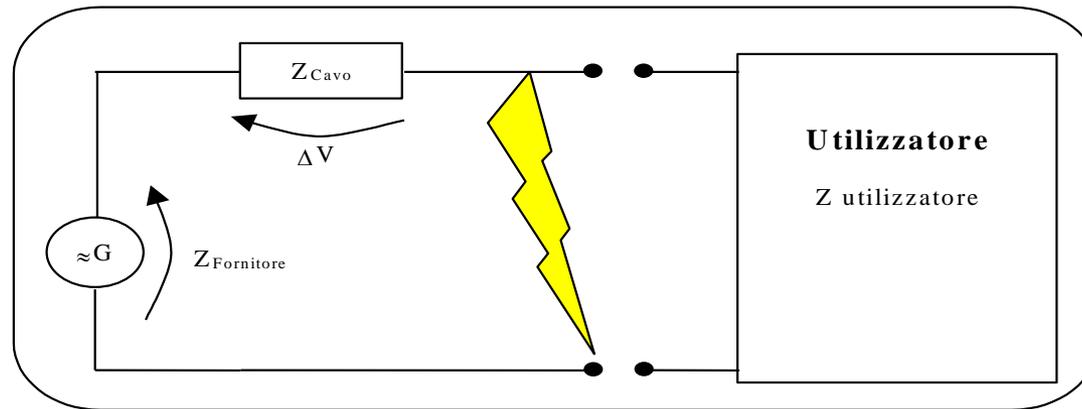
$$\Delta T = k P < \Delta T_{\max}$$

dove il coefficiente  $k$  si trova nelle tabelle caratteristiche fornite dal costruttore del cavo.

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Verifica al corto circuito

Si definisce corto circuito una situazione anomala in cui l'impedenza totale sul circuito stesso, a causa di guasti o di errate manovre, tende a zero.



In questi casi, l'unica impedenza che trova il generatore è costituita dall'impedenza della linea, solitamente molto bassa. Il generatore, riversando sul circuito tutta la potenza di cui dispone, causa un drastico innalzamento delle correnti circolanti, con conseguente fusione delle guaine, azioni dinamiche tra cavi, ecc.

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Verifica al corto circuito

La situazione precedentemente descritta, oltre che attraverso opera di prevenzione, va combattuta anche in caso essa si verifichi. Per far questo è necessario munire il circuito di interruttori che, pur sotto l'elevatissimo carico del corto circuito, siano in grado di interrompere il passaggio della corrente.

Questi interruttori, assai costosi, vanno dimensionati conoscendo la corrente che circolerà in caso di corto circuito.

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Verifica al corto circuito

La determinazione delle correnti di corto circuito per via analitica risulta complessa, soprattutto quando si analizzano circuiti composti da più maglie, e con la presenza di più generatori.

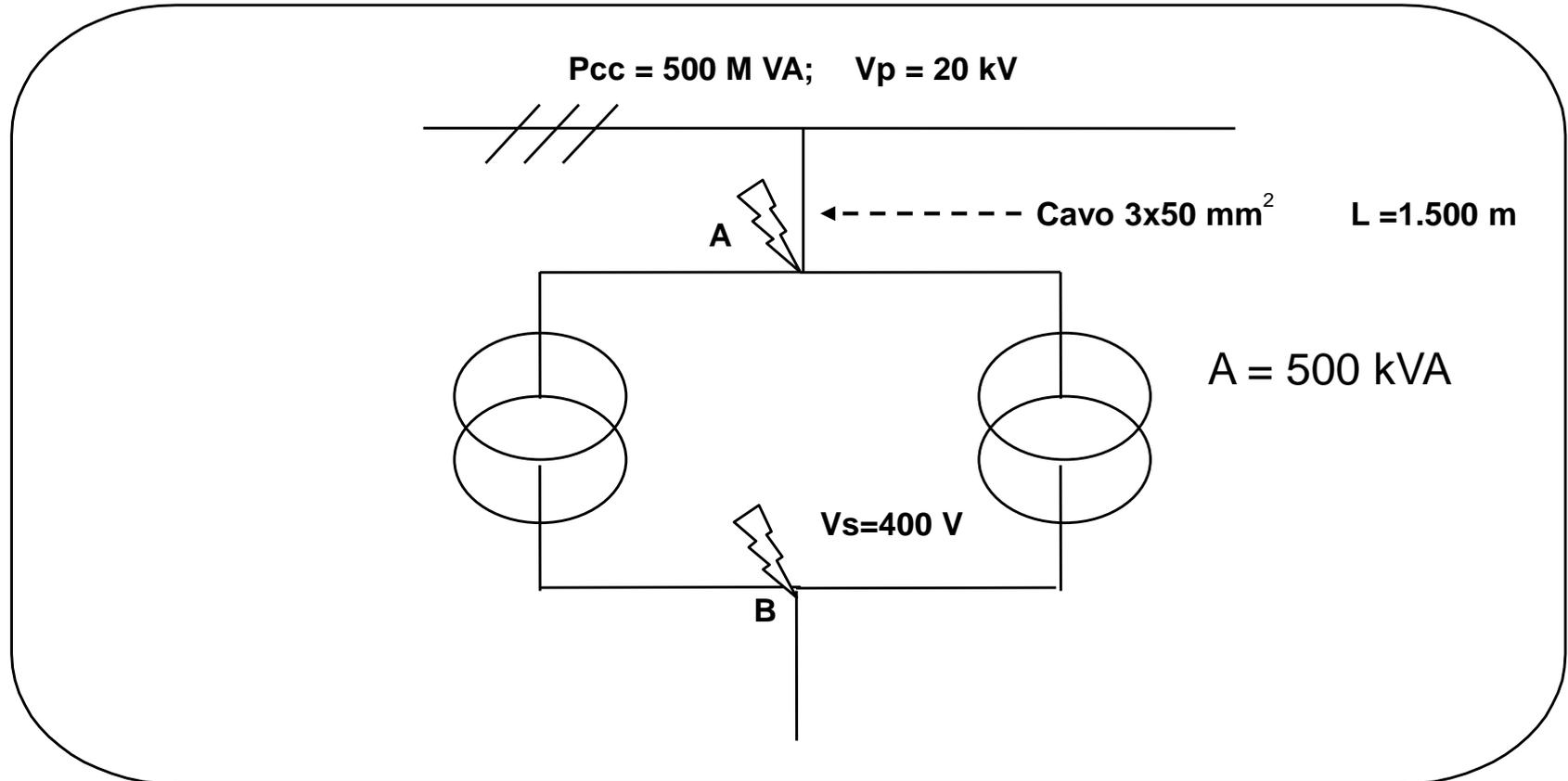
In tali casi si fa ricorso a:

- Simulazioni al calcolatore;
- Simulazioni su modellini in “scala”.

Vediamo a seguire un esempio di calcolo del valore medio della corrente  $I_{cc}$  per un caso semplice.

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Verifica al corto circuito: esempio



# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Verifica al corto circuito: esempio

Tipo di corto circuito:

contatto accidentale tra una fase ed il neutro

Verranno analizzati due casi:

1. Corto circuito nel punto A, cioè sul primario
2. Corto circuito nel punto B, cioè sul secondario

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Verifica al corto circuito: dati

- $P_{cc} = 500 \text{ MVA}$  = Potenza di corto circuito della rete = massima potenza che la rete è in grado di riversare nel punto A, in caso di corto circuito
- $V_p = 20 \text{ kV}$  = Tensione di linea del primario [rete e ingresso nell'utenza A]
- Caratteristiche del cavo:
  - $L = 1.500 \text{ m}$  = Lunghezza
  - $S = 3 \times 50 \text{ mm}^2$  = Sezione
  - $r = 0,422 \text{ } (\Omega/\text{km} \cdot \text{fase})$  = Resistenza specifica
  - $x = 0,0807 \text{ } (\Omega/\text{km} \cdot \text{fase})$  = Reattanza specifica

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Verifica al corto circuito: dati

- $A = 500 \text{ kVA}$  = Potenza nominale trasformatori dell'utenza
- $V_s = 400 \text{ V}$  = Tensione di linea del secondario [utilizzatori dell'utenza B]
- $V_{cc} = 5\%$  = Tensione % di corto circuito = % delle tensione nominale del primario da applicare sul primario per far circolare, sul secondario chiuso in corto circuito, una corrente pari a quella nominale  $I_n$

NB: i trasformatori sono due, ma uno è di riserva, per cui:

- la corrente assorbita dall'utenza si calcola considerando un solo trasformatore
- l'impedenza dovuta ai trasformatori si calcola considerando la presenza di due trasformatori in parallelo

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

Verifica al corto circuito: Analisi punto A

Per conoscere la  $I_{cc}$ , in qualsiasi punto la si voglia calcolare, si deve applicare espressione:

$$V_F = Z \cdot I ; \quad V_L = \sqrt{3} \cdot V_F$$

$$V_L = \sqrt{3} \cdot Z \cdot I$$

dove  $Z$  è l'impedenza a monte del punto da analizzare.

Per il punto A,  $Z_A = Z_{rete} + Z_{cavo MT}$

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

Verifica al corto circuito: Analisi punto A

La  $Z_{rete}$  dipende dalla potenza di corto circuito  $P_{cc}$  che la rete è in grado di riversare nel punto A ed il suo calcolo si esegue a partire da:

$$P_{cc} = V_p^2 / Z_{rete}$$
$$Z_{rete} = V_p^2 / P_{cc} = 0,8 \Omega/\text{fase}$$

Il comportamento della rete è solo di tipo induttivo, per cui  $R_{rete} = 0$  e  $Z_{rete} = X_{rete}$  :

$$X_{rete} = Z_{rete} = 0,8 \Omega/\text{fase}$$

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

Verifica al corto circuito: Analisi punto A

L'impedenza del cavo si ricava dalle sue caratteristiche:

$$R_{MT} = 0,422 [\Omega/\text{km} \cdot \text{fase}] \cdot 1,5 [\text{km}] \approx 0,633 \Omega/\text{fase}$$

$$X_{MT} = 0,0807 [\Omega/\text{km} \cdot \text{fase}] \cdot 1,5 [\text{km}] \approx 0,121 \Omega/\text{fase}$$

L'impedenza del punto A si ottiene combinando la resistenza e reattanza di rete e cavo misurate al punto A.

$$R_A = 0 + 0,633 = 0,633 \Omega/\text{fase}$$

$$X_A = 0,121 + 0,800 = 0,921 \Omega/\text{fase}$$

$$Z_A = \sqrt{(R_A^2 + X_A^2)} = 1,12 \Omega/\text{fase}$$

$$I_{CC_A} = 20.000 / (\sqrt{3} \cdot 1,12) = 10.310 \text{ A}$$

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

Verifica al corto circuito: Analisi punto A

Commento:

Se il corto circuito si verificasse nel punto di connessione alla rete, si avrebbe  $L = 0$  e la  $I_{ccA}$  dipenderebbe solo da  $Z_{rete}$ , cioè dipenderebbe unicamente da  $P_{cc}$

Si avrebbe:

$$I_{ccA} = 20.000 / (\sqrt{3} \cdot Z_{rete}) = 20.000 / (\sqrt{3} \cdot 0,8) = 14.433 \text{ A}$$

La presenza della linea fra la rete ed A fa diminuire  $I_{ccA}$  e questa diminuisce sempre più all'aumentare di L.

Se L tende ad infinito,  $I_{ccA}$  tende a 0.

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

Verifica al corto circuito: Analisi punto B

Anche per questo calcolo, è necessario conoscere l'impedenza a monte di B. Tra il punto B ed il punto A è interposto il parallelo dei due trasformatori, i quali a propria volta si pongono in serie all'impedenza già calcolata per il punto A.

L'impedenza di un generico trasformatore si calcola, come qualsiasi impedenza, dalla formula:

$$Z_{\text{trasf}} = V_L / (\sqrt{3} \cdot I) \quad [\text{Ohm/fase}].$$

Se si applica al primario una tensione  $V_p \cdot V_{cc}$ , al secondario chiuso in corto circolerà la corrente nominale  $I_n$  sotto una differenza di potenziale pari a  $V_s \cdot V_{cc}$ .

(N.B.  $V_{cc}$  è adimensionale, è una %)

$$Z_{\text{trasf}} = (V_s \cdot V_{cc}) / (\sqrt{3} \cdot I_n) \quad [\text{Ohm/fase}].$$

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Verifica al corto circuito: Analisi punto B

La corrente nominale  $I_n$  si calcola da  $A_n = \sqrt{3} \cdot V_s \cdot I_n$ , da cui :

$$I_n = A_n / (\sqrt{3} \cdot V_s) = 722 \text{ A}$$

Da cui:

$$Z_{\text{trasf}} = (V_s \cdot V_{cc}) / (\sqrt{3} \cdot I_n) = 400 \cdot 5\% / (\sqrt{3} \cdot 722) = 0,016 \text{ } \Omega/\text{fase}$$

Lo stesso risultato si può anche ricavare effettuando le opportune sostituzioni e arrivando a:

$$Z_{\text{trasf}} = (V_s^2 \cdot V_{cc}) / A_n = (400^2 \cdot 5\%) / 500.000 = 0,016 \text{ } \Omega/\text{fase}$$

Anche il comportamento del trasformatore, come quello della rete, è solo di tipo induttivo  $\rightarrow X_{\text{trasf}} = Z_{\text{trasf}}$

Poiché i trasformatori sono 2 in parallelo, la  $X_{\text{trasf-tot}}$  è pari a:

$$X_{\text{trasf-tot}} = X_{\text{trasf}} / 2 = 0,008 \text{ Ohm/fase.}$$

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Verifica al corto circuito: Analisi punto B

Per calcolare la  $Z_B$  corretta si deve tener conto che l'impedenza  $Z_A$ , misurata sotto una tensione  $V_p = 20.000$  V, appare diversa se misurata sotto un regime di tensione  $V_s = 400$  V.

A meno delle perdite del trasformatore (che trascuriamo), vale la legge di conservazione della potenza, cioè  $P_p = P_s$  :

$$P = V_p^2 / Z_{A-p} = V_s^2 / Z_{A-s}$$

da cui:

$$Z_{A-s} / Z_{A-p} = (V_s / V_p)^2$$



$$R_{A-s} = R_A \cdot (V_s / V_p)^2 \approx 0,00025 \text{ } \Omega / \text{fase} \quad X_{A-s} = X_A \cdot (V_s / V_p)^2 \approx 0,00037 \text{ } \Omega / \text{fase}$$

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

Verifica al corto circuito: Analisi punto B

L'impedenza del punto B è quindi pari alla somma dell'impedenza fino ad A, vista adesso con gli occhi del secondario, più l'impedenza dei due trasformatori.

$$R_B = 0,00025 + 0 = 0,00025 \Omega / \text{fase}$$

$$X_B = 0,008 + 0,00037 = 0,00837 \Omega / \text{fase}$$

$$Z_B = \sqrt{(R_B^2 + X_B^2)} = 0,00837 \Omega / \text{fase}$$

$$I_{CC_B} = 400 / (\sqrt{3} \cdot 0,00837) = 27.590 \text{ A}$$

L'abbassamento della tensione sul secondario causa un aumento della corrente di lavoro proporzionale a  $V_p/V_s$ , per cui è ovvio che anche la corrente di corto del secondario sia più elevata. Tuttavia, l'innalzamento di  $I_{CC_B}$  è abbastanza contenuto (non è proporzionale al quadrato di  $V_p/V_s$ ), grazie all'impedenza introdotta dai trasformatori.

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Verifica al corto circuito

Conoscendo le correnti di corto circuito, si possono quindi dimensionare gli interruttori.

Se si considera che, all'aumentare della potenza nominale dei trasformatori diminuisce la loro impedenza, si troverà giustificazione di quanto detto precedentemente in merito al costo dei sistemi di protezione.

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

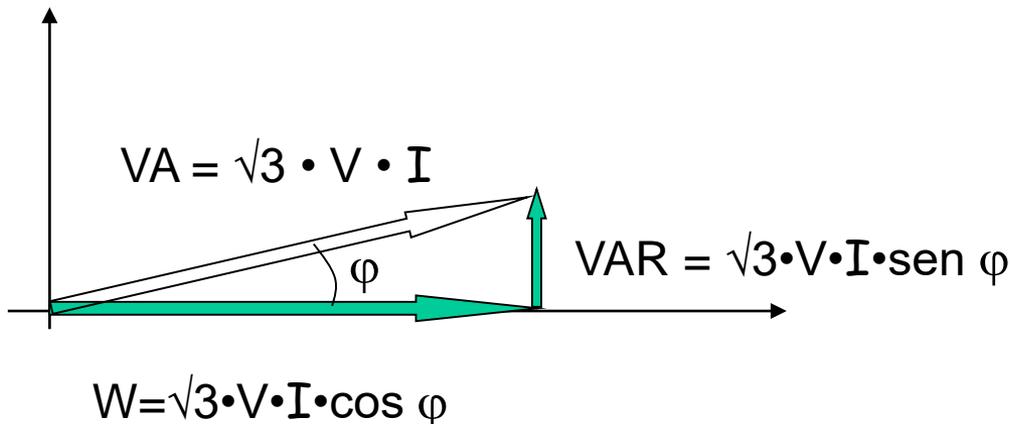
## Verifica del fattore di potenza

Si definisce **fattore di potenza** il  $\cos \varphi$ , essendo  $\varphi$  lo sfasamento in radianti tra tensione e corrente.

Come mostra la figura, al crescere di  $\varphi$  e a pari tensione  $V$ , per ottenere la medesima potenza attiva  $W$  è necessario impiegare più corrente, con perdite più elevate. Per questo motivo l'ente fornitore dell'energia limita lo sfasamento massimo ammesso (solitamente  $\cos \varphi \in [0,8 - 0,9]$ ).

Per  $\cos \varphi = 0,8 \rightarrow \varphi = 37^\circ \rightarrow \sin \varphi = 0,6 \rightarrow \text{VAR}/W = 0,75$

Per  $\cos \varphi = 0,9 \rightarrow \varphi = 26^\circ \rightarrow \sin \varphi = 0,43 \rightarrow \text{VAR}/W = 0,48$



# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Verifica del fattore di potenza

Lo sfasamento tra tensione e corrente viene indotto, in un impianto di natura industriale, da tutti quegli utilizzatori che hanno bisogno di generare campi elettromagnetici per il loro funzionamento (motori, trasformatori).

Questi carichi sono tutti di natura induttiva, per cui per “rifasare” è necessario introdurre nel circuito dei carichi capacitivi.

Il calcolo della capacità complessiva necessaria per passare da uno sfasamento  $\varphi$  ad uno  $\varphi'$ , è dato dalla potenza reattiva da compensare:

$$\Delta Q = W (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi')$$

Esempio: per passare da  $\cos \varphi = 0,8$  a  $\cos \varphi' = 0,9$

$$\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi' = 0,75 - 0,48 = 0,27$$

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Verifica del fattore di potenza

Per ottenere una capacità idonea per dare  $\Delta Q$ , nota la tensione con cui si alimenta la batteria di condensatori, è sufficiente applicare la legge di Ohm:

$$Z_{\text{cap}} = V^2 / \Delta Q$$

$$Z_{\text{cap}} = 1 / (2\pi f c)$$

f = frequenza alimentazione;

c = capacità complessiva condensatori.

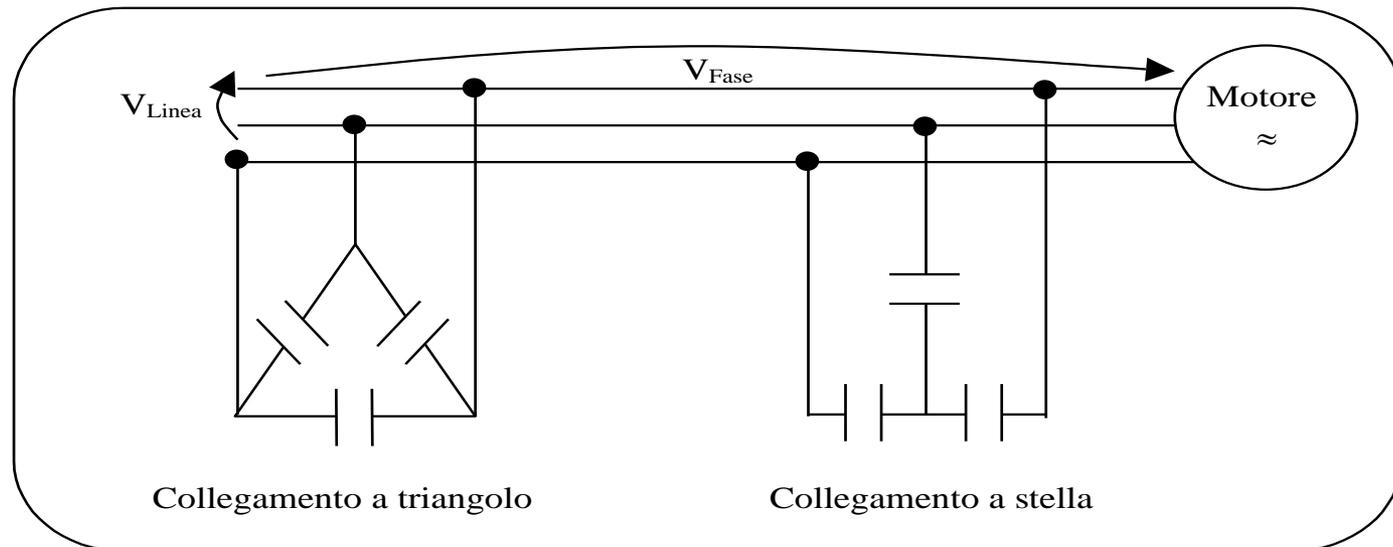
Note queste grandezze, è possibile conoscere la capacità totale necessaria, che verrà poi messa a disposizione da più batterie di condensatori.

$$c = \Delta Q / (V^2 \cdot 2\pi f)$$

# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Verifica del fattore di potenza

Dato che la capacità necessaria è inversamente proporzionale al quadrato della tensione, lo schema di collegamento a triangolo è più vantaggioso rispetto al collegamento a stella, in quanto nel primo caso la tensione applicata è quella di linea ( $=\sqrt{3} \cdot V_F$ ).



# PROGETTAZIONE D'IMPIANTO

## Verifica del fattore di potenza

Anche per il rifasamento valgono considerazioni di centralizzazione / decentralizzazione:

- Lo sfasamento indotto è legato all'utilizzo delle macchine, che non è contemporaneo;
- Se i carichi induttivi sono pochi, conviene rifasarli localmente;
- Il rifasamento locale comporta più oneri di manutenzione, e più varietà di componenti da gestire in casa;
- La scelta centralizzata è sempre penalizzata sotto il profilo della disponibilità di funzionamento (globale).