

# Indice del Volume I

## Introduzione – Generalità sugli impianti elettrici

<b><i>I.1 Produzione, trasporto, distribuzione, utilizzazione dell'energia elettrica</i></b> .....	1
I.1.1 Impianti di produzione .....	2
I.1.2 Impianti di trasporto .....	4
I.1.3 Impianti di distribuzione .....	4
I.1.4 Impianti utilizzatori .....	5
<b><i>I.2 Scelte tecniche fondamentali</i></b> .....	6
I.2.1 Sistema di alimentazione .....	6
I.2.2 Natura della corrente .....	6
I.2.3 Frequenza d'esercizio .....	7
A. Trasformatori .....	8
B. Macchine elettriche rotanti .....	9
C. Linee .....	11
D. Altri componenti .....	11
I.2.4 Tensioni d'esercizio .....	12
A. Tensione nominale .....	12
A.1 Impianti di produzione .....	13
A.2 Reti di trasporto .....	14
A.3 Reti di distribuzione a media tensione .....	14
A.4 Reti di distribuzione a bassa tensione .....	14
B. Tensione nominale verso terra .....	15
I.2.5 Stato del neutro nelle reti trifasi .....	15
<b><i>I.3 Confronti relativi alle linee di trasmissione</i></b> .....	18
I.3.1 Confronto tra la corrente alternata trifase e monofase .....	18
I.3.2 Confronto tra la corrente alternata trifase e la corrente continua .....	20
I.3.3 Considerazioni sul trasporto in corrente alternata e in corrente continua ...	22

A. Problemi del trasporto in corrente alternata .....	22
A.1 Funzionamento a vuoto .....	22
A.2 Funzionamento a carico .....	25
A.3 Provvedimenti migliorativi .....	26
B. Utilizzo del trasporto in corrente continua .....	29
C. Ulteriori considerazioni .....	31
D. Tipologie dei collegamenti HVDC .....	32
E. Tecnologie dei convertitori .....	36
<b>I.4 Struttura delle reti .....</b>	<b>37</b>
<b>I.5 Analisi e controllo del sistema elettrico di potenza .....</b>	<b>39</b>
<b>I.6 Mercato libero dell'energia elettrica in Italia .....</b>	<b>40</b>
<b>I.7 Normalizzazione, unificazione, certificazione e controllo .....</b>	<b>42</b>
<b>I.8 Schemi elettrici e segni grafici .....</b>	<b>47</b>
I.8.1 Tipi di documenti .....	48
I.8.2 Tipi di rappresentazione .....	49
 <b>Capitolo 1 – Reti elettriche in regime sinusoidale</b>	
<b>I.1 Richiami sull'analisi dei circuiti in regime sinusoidale .....</b>	<b>51</b>
1.1.1 Generalità sulle grandezze sinusoidali .....	51
A. Grandezze periodiche .....	52
A.1 Valori caratteristici .....	52
A.2 Sviluppo in serie di Fourier .....	53
A.3 Valore efficace .....	54
A.4 Fattore di forma .....	54
1.1.2 Sfasamento tra grandezze sinusoidali isofrequenziali .....	56
1.1.3 Rappresentazione simbolica delle grandezze sinusoidali .....	58
1.1.4 Operazioni sulle grandezze sinusoidali .....	60
1.1.5 Soluzione di regime dei circuiti con forzanti sinusoidali .....	60
A. Circuito RL .....	60
B. Il metodo simbolico .....	62
B1. Leggi dei circuiti in forma simbolica .....	62
B2. Equazione di Ohm in forma simbolica .....	63

C. Studio delle reti con il metodo simbolico .....	64
C.1 Trasformazione stella-triangolo .....	65
C.2 Teorema di Millman .....	66
1.1.6 Teoremi sulle reti .....	67
A. Teorema di sostituzione .....	68
B. Teorema di sovrapposizione degli effetti .....	68
C. Teorema di Thévenin .....	69
D. Teorema di Norton .....	70
E. Teorema di reciprocità .....	70
F. Enunciati generali dei teoremi sulle reti .....	72
1.1.7 Cenni sui circuiti risonanti .....	76
A. Risonanza tipo serie .....	77
A.1 Sopraelevazione di tensione .....	78
B. Risonanza tipo parallelo .....	78
B.1 Sopraelevazione di corrente .....	79
B.2 Un altro esempio di risonanza tipo parallelo .....	80
1.1.8 Metodi generali per l'analisi delle reti di bipoli .....	81
A. Impostazione del problema di analisi .....	81
B. Richiami sui grafi .....	83
B.1 Insiemi di taglio fondamentali e maglie fondamentali .....	84
C. Metodi di soluzione agli insiemi di taglio e alle maglie fondamentali ...	86
D. Metodo dei potenziali e metodo delle correnti cicliche .....	94
1.1.9 Potenze in regime sinusoidale .....	98
A. Potenza istantanea .....	99
B. Potenze istantanee attiva e reattiva .....	100
C. Potenza attiva .....	101
D. Potenza reattiva .....	104
E. Potenza apparente .....	105
1.1.10 Potenze assorbite da un bipolo passivo .....	106
1.1.11 Sommabilità delle potenze .....	106
A. Rete chiusa .....	106
B. Rete aperta .....	107
C. Teorema di Tellegen .....	109
D. Esempi di applicazioni impiantistiche del teorema di Boucherot .....	110
D1. Rifasamento dei carichi .....	110
D2. Analisi di un circuito mediante il teorema di Boucherot .....	113
1.1.12 Energia attiva ed energia reattiva .....	115

A. Definizioni .....	115
A.1 Energia attiva .....	115
A.2 Energia reattiva .....	116
B. Misura dell'energia attiva e dell'energia reattiva .....	116
B.1 Tipologie dei contatori .....	117
<b>1.2 Sistemi trifasi .....</b>	<b>120</b>
1.2.1 Generalità sui sistemi trifasi .....	120
1.2.2 Sistemi trifasi simmetrici ed equilibrati .....	122
1.2.3 Generatori trifasi .....	124
1.2.4 Utilizzatori trifasi .....	126
A. Collegamento a triangolo .....	126
B. Collegamento a stella .....	127
B.1 Spostamento del centro stella .....	128
B.2 Applicazione del teorema di Millman .....	131
1.2.5 Circuito monofase equivalente .....	131
1.2.6 Teorema di equivalenza .....	133
1.2.7 Potenze nei sistemi trifasi .....	134
A. Potenza istantanea, potenza attiva, potenza reattiva .....	135
B. Potenze nei sistemi simmetrici ed equilibrati .....	137
B.1 Potenza apparente complessa .....	137
B.2 Potenza attiva e potenza reattiva .....	137
B.3 Potenza istantanea .....	138
1.2.8 Misura delle potenze nei sistemi trifasi .....	138
A. Misura della potenza attiva .....	138
B. Misura della potenza reattiva .....	142
1.2.9 Sistemi trifasi a quattro fili .....	146
A. Esempi di analisi dei circuiti trifasi a quattro fili .....	146
B. Potenze nei sistemi trifasi a quattro fili .....	149
C. Misura della potenza attiva .....	149
D. Misura della potenza reattiva .....	150
1.2.10 Misura dell'energia attiva e dell'energia reattiva nei sistemi trifasi .....	151
1.2.11 Alcuni esempi di applicazioni impiantistiche .....	151
A. Formule della caduta di tensione sulle linee corte .....	151
A.1 Definizioni .....	151
A.2 Diagrammi fasoriali .....	152

A.3 Calcolo esatto della c.d.t. ....	153
A.4 Formula della caduta di tensione industriale ....	154
A.5 Formule approssimate ottenute da sviluppi in serie ....	155
A.6 C.d.t. su di una linea monofase ....	156
A.7 Confronto tra le formule della c.d.t. ....	157
B. Esempi di utilizzo delle formule della c.d.t. ....	158
B.1 Applicazioni della formula della c.d.t. industriale ....	158
B.2 Esempio di calcolo di load flow ....	161
B.3 Esempio relativo al fenomeno del collasso di tensione ....	162
B.4 Potenza trasmissibile al limite della stabilità statica ....	166
<b>1.3 Componenti simmetrici dei sistemi trifasi</b> .....	<b>169</b>
1.3.1 Terne simmetriche .....	169
1.3.2 Scomposizione di una terna dissimmetrica .....	170
1.3.3 Matrici di trasformazione .....	171
1.3.4 Analisi delle reti trifasi mediante i componenti simmetrici .....	172
A. Esempi introduttivi .....	172
A.1 Rete trifase a tre fili .....	172
A.2 Rete trifase a quattro fili .....	176
B. Reti i cui elementi presentano mutui accoppiamenti .....	178
C. Elementi di rete con mutui accoppiamenti e particolari simmetrie .....	180
1.3.5. Circuiti e reti di sequenza .....	183
A. Caso delle reti trifasi a tre fili .....	183
A.1 Elemento serie doppio-tripolare .....	184
A.2 Elemento tripolare attivo con collegamento a stella .....	186
A.3 Elemento tripolare passivo con collegamento a stella .....	187
A.4 Elemento tripolare passivo con collegamento a triangolo .....	188
A.5 Esempi applicativi .....	190
B. Caso delle reti trifasi a quattro fili .....	207
B.1 Elemento serie doppio-quadripolare .....	208
B.2 Elemento quadripolare attivo con collegamento a stella .....	210
B.3 Elemento quadripolare passivo con collegamento a stella .....	212
B.4 Esempi applicativi .....	213
C. Considerazioni sugli elementi serie .....	232
1.3.6 Espressioni delle potenze con i componenti simmetrici .....	236

## Capitolo 2 – I trasformatori nelle reti elettriche di potenza

<b>2.1 Modelli dei trasformatori</b> .....	241
2.1.1 Trasformatore monofase a due avvolgimenti .....	241
A. Circuito equivalente del trasformatore reale .....	241
B. Equazioni del trasformatore ideale .....	242
B.1 Trasferimento di impedenze e ammettenze .....	243
C. Circuiti equivalenti ridotti al lato 1 o al lato 2 .....	245
D. Altri circuiti equivalenti .....	246
D.1 Circuito equivalente a $\pi$ greco .....	246
D.2 Circuito equivalente a T .....	247
D.3 Quadripolo equivalente del trasformatore monofase .....	248
E. Individuazione dei parametri dei circuiti equivalenti .....	249
E.1 Prova a vuoto .....	249
E.2 Prova in corto circuito .....	250
E.3 Complementi sulle prove .....	251
F. Bilancio energetico, rendimento e variazione di tensione .....	252
F.1 Bilancio energetico .....	252
F.2 Rendimento .....	252
F.3 Variazione di tensione .....	254
2.1.2 Trasformatore trifase a due avvolgimenti .....	255
A. Trasformatore trifase ideale .....	256
A.1 Collegamento stella-stella .....	257
A.2 Collegamento stella-triangolo .....	257
A.3 Collegamento triangolo-stella .....	258
A.4 Collegamento triangolo-triangolo .....	259
B. Rapporto e gruppo di trasformazione .....	260
C. Circuiti equivalenti del trasformatore trifase reale .....	260
D. Rendimento e variazione di tensione .....	262
E. Trasferimento di impedenze e ammettenze .....	263
F. Possibilità di non mettere in conto il gruppo di trasformazione .....	263
F.1 Rete radiale con un solo generatore di tensione .....	265
F.2 Rete radiale con generatori di tensione disposti in tutte le sottoreti .....	266
2.1.3 Trasformatore a rapporto variabile .....	267
2.1.4 Trasformatore a tre avvolgimenti .....	270
A. Trasformatore monofase .....	270

A.1 Trasformatore ideale .....	270
A.2 Circuito equivalente del trasformatore reale .....	271
A.3 Circuiti equivalenti ridotti .....	272
A.4 Identificazione dei parametri .....	272
B. Trasformatore trifase a tre avvolgimenti .....	277
B.1 Circuito monofase equivalente .....	277
2.1.5 Autotrasformatore .....	278
A. Autotrasformatore monofase .....	279
A.1 Equazioni .....	279
A.2 Circuito equivalente dell'autotrasformatore reale .....	280
A.3 Identificazione dei parametri .....	282
A.4 potenze apparenti: passante, nominale, di dimensionamento .....	283
A.5 Confronti con il trasformatore a due avvolgimenti .....	284
A.6 Vantaggi e svantaggi dell'autotrasformatore .....	293
B. Autotrasformatore trifase .....	293
<b>2.2 Grandezze in valore relativo .....</b>	<b>296</b>
2.2.1 Definizioni .....	296
A. Grandezze di base indipendenti e derivate .....	297
B. Cambiamento della base di riferimento .....	298
C. Proprietà dei valori relativi .....	298
2.2.2 Reti contenenti trasformatori a due avvolgimenti .....	298
A. Variazione di tensione in valore relativo .....	302
B. Circuito equivalente a $\pi$ greco .....	302
C. Circuito equivalente a T .....	303
2.2.3 Eliminazione dei trasformatori ideali in reti complesse .....	303
2.2.4 Reti trifasi .....	304
A. Grandezze di base e valori relativi .....	304
B. Circuito monofase equivalente ai valori relativi .....	305
C. Eliminazione dei trasformatori ideali in reti trifasi complesse .....	307
2.2.5 Equazioni ai valori relativi del trasformatore a rapporto variabile .....	307
2.2.6 Equazioni ai valori relativi del trasformatore a tre avvolgimenti .....	308
A. Osservazioni .....	310
B. Valori relativi nel caso trifase .....	311
2.2.7 Circuito equivalente i valori relativi dell'autotrasformatore .....	311

## Capitolo 3 – Introduzione ai calcoli di rete

<b>3.1 Generalità</b> .....	315
<b>3.2 Calcolo delle correnti di corto circuito trifase simmetrico</b> .....	317
3.2.1 Esempio introduttivo .....	317
A. Uso dei valori assoluti .....	318
A.1 Funzionamento pre-guasto .....	318
A.2 Funzionamento in corto circuito trifase simmetrico .....	319
B. Uso dei valori relativi .....	321
C. Sfasamenti .....	326
3.2.2 Applicazioni dei teoremi sulle reti .....	326
A. Esempio introduttivo .....	326
B. Uso del teorema di Thévenin .....	328
C. Uso del teorema di Norton .....	331
3.2.3 Calcolo delle correnti di corto circuito .....	333
A. Applicazione del teorema di Thévenin .....	333
B. Procedura semplificata .....	334
C. Esempi che mettono in conto il regime pre-guasto .....	335
C.1 Caso dell'utilizzatore statico .....	336
C.2 Caso dell'utilizzatore attivo .....	338
C.3 Discussione dei risultati degli esempi .....	340
C.4 Contributo degli utilizzatori alla corrente di corto circuito .....	341
3.2.4 Messa in conto del gruppo dei trasformatori .....	342
3.2.5 Esempio di calcolo delle correnti nei lati e delle tensioni nodali .....	346
A. Procedura semplificata .....	348
B. Procedura completa .....	352

## Appendice A – Complementi sui trasformatori

A.1 Gruppi di trasformazione dei trasformatori trifasi .....	357
A.1.1 Collegamento stella-stella, gruppi 0 e 6 .....	357
A.1.2 Collegamento triangolo-triangolo, gruppi 0 e 10 .....	358
A.1.3 Collegamento stella-triangolo, gruppi 11 e 1 .....	358
A.1.4 Collegamento a zig-zag .....	358
A.2 Considerazioni sull'utilizzo dei diversi tipi di collegamento .....	363
A.2.1 Armoniche della corrente magnetizzante e del flusso .....	363
A.2.2 Comportamento in relazione al carico .....	365

---

a) Trasformatori di distribuzione MT/BT .....	365
a1) Yyn con carico squilibrato .....	365
a2) Collegamenti Dyn e Yzn .....	373
a3) Collegamenti Dy, Yd, Yy .....	374
b) Trasformatori di distribuzione AT/MT .....	375
c) Interconnessione di reti AT .....	376
d) Utilità del collegamento a triangolo .....	376
A.3 Parallelo dei trasformatori .....	377
A.4 Modello classico del trasformatore monofase .....	380
A.5 Modello matriciale del trasformatore monofase .....	389
 <b>Appendice B – Esercizi sui trasformatori</b>	
B.1 Trasformatore trifase a due avvolgimenti .....	403
B.2 Trasformatore monofase a tre avvolgimenti .....	406
B.3 Trasformatore trifase a tre avvolgimenti .....	410
B.4 Autotrasformatore trifase .....	417
B.5 Armoniche della corrente magnetizzante e dei flussi .....	419
B.6 Trasformatore MT/BT: guasto monofase a terra lato BT .....	428
 <b>Bibliografia</b> .....	 431