

Cesare Caramazza

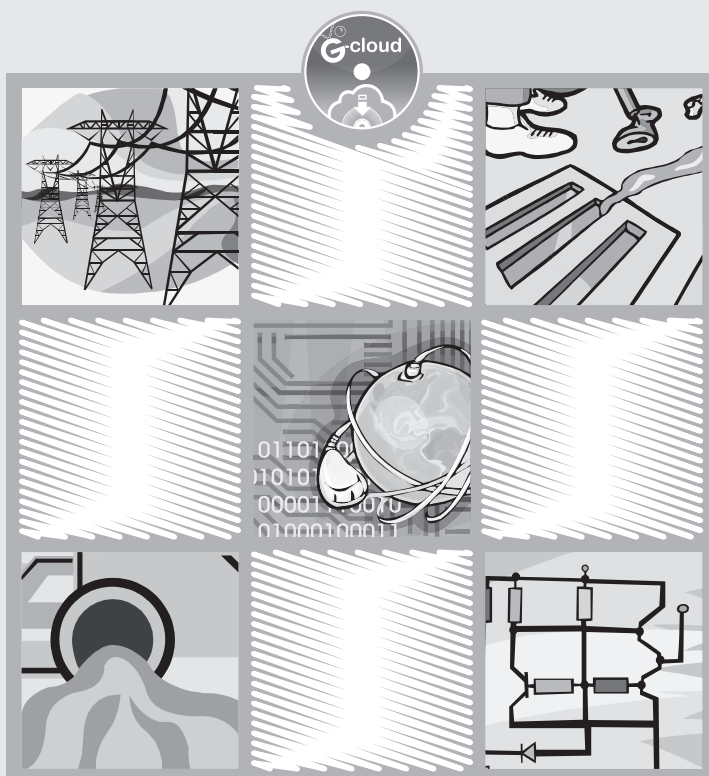
# GUIDA AGLI INTERVENTI PER IL RISPARMIO ENERGETICO NEGLI IMPIANTI ELETTRICI

## AUDIT ENERGETICI ELETTRICI E TARIFFARI

### SOFTWARE INCLUSO

ESEMPI DI AUDIT ENERGETICO ELETTRICO PER IL CONTENIMENTO DEI CONSUMI  
E PER IL CONTENIMENTO DEI COSTI E TESTO DELLA DIRETTIVA 2003/54/CE

**Glossario** (termini tecnico-normativi), **F.A.Q.** (domande e risposte sui principali argomenti),  
**Test iniziale** (verifica della formazione di base), **Test finale** (verifica dei concetti analizzati)



GRAFILL

Cesare Caramazza

## GUIDA AGLI INTERVENTI PER IL RISPARMIO ENERGETICO NEGLI IMPIANTI ELETTRICI

ISBN 13 978-88-8207-529-3

EAN 9 788882 075293

Formulari & Guide, 36

Prima edizione, luglio 2013

Caramazza, Cesare <1975->

Guida agli interventi per il risparmio energetico negli impianti elettrici

/ Cesare Caramazza. – Palermo : Grafill, 2013.

(Formulari & guide ; 36)

ISBN 978-88-8207-529-3

1. Impianti elettrici – Risparmio energetico.

621.31042 CDD-22

SBN Pal0259816

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313

Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail [grafill@grafill.it](mailto:grafill@grafill.it)

Finito di stampare nel mese di luglio 2013

presso **Officine Tipografiche Aiello & Provenzano S.r.l.** Via del Cavaliere, 93 – 90011 Bagheria (PA)

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

Alle mie numerose donne.



---

---

# Indice

Prefazione .....	p.	9
<b>1. Elementi di elettrotecnica</b> .....	"	13
1.1. Premesse .....	"	13
1.2. La corrente continua e la corrente alternata .....	"	13
1.3. Circuiti resistivi monofasi .....	"	14
1.4. Circuiti induttivi ed ohmico induttivi monofasi .....	"	15
1.5. Potenza attiva .....	"	19
1.6. Potenza reattiva .....	"	20
1.7. Potenza apparente in circuiti monofasi .....	"	21
1.8. Perdite in linea per un circuito monofase .....	"	22
1.9. Il rifasamento .....	"	24
1.10. Forma d'onda reale delle grandezze elettriche – componenti armoniche .....	"	25
<b>2. I sistemi trifase</b> .....	"	26
2.1. Generalità .....	"	26
2.2. Collegamento a stella .....	"	26
2.3. Grandezze caratteristiche negli impianti trifasi connessi a stella .....	"	28
2.4. Collegamento a triangolo .....	"	29
2.5. Confronto tra un sistema monofase ed uno trifase .....	"	30
2.6. Correnti di corto circuito .....	"	36
2.7. Componenti armoniche nei sistemi trifase .....	"	38
<b>3. Elementi di illuminotecnica</b> .....	"	40
3.1. Premesse .....	"	40
3.2. Principi di fotometria .....	"	40
3.3. Principi di colorimetria .....	"	41
3.4. Le sorgenti luminose .....	"	43
3.5. Lampade ad incandescenza .....	"	45
3.6. Lampade alogene .....	"	46
3.7. Lampade a LED .....	"	47

<b>3.8.</b>	Lampade a scarica .....	p.	49
<b>3.8.1.</b>	Lampade HID – vapori di mercurio .....	"	49
<b>3.8.2.</b>	Lampade HID – alogenuri metallici .....	"	50
<b>3.8.3.</b>	Lampade HID – vapori di sodio bassa pressione (SBP) ...	"	51
<b>3.8.4.</b>	Lampade HID – vapori di sodio alta e altissima pressione (SAP) .....	"	52
<b>3.8.5.</b>	Lampade LID – tubolari fluorescenti .....	"	52
<b>3.8.6.</b>	Lampade LID –fluorescenti compatte .....	"	53
<b>4.</b>	<b>Approccio metodologico per un audit energetico elettrico</b> .....	"	55
<b>4.1.</b>	Premesse .....	"	55
<b>4.2.</b>	Definizione degli obiettivi da raggiungere e delle modalità di reperimento delle risorse economiche per gli interventi .....	"	56
<b>4.3.</b>	Definizione dell'incarico .....	"	58
<b>4.4.</b>	Raccolta della documentazione iniziale .....	"	60
<b>4.5.</b>	Raccolta dati sul campo .....	"	61
<b>4.6.</b>	Misure sui quadri elettrici .....	"	61
<b>4.7.</b>	Misure sul livello di illuminamento medio .....	"	63
<b>4.8.</b>	Misure di temperatura ad impianti di climatizzazione accesi .....	"	64
<b>4.9.</b>	Individuazione e ricostruzione dell'assorbimento dei carichi di maggior peso .....	"	65
<b>4.10.</b>	Individuazione di marcate inefficienze .....	"	67
<b>4.11.</b>	Individuazione di difetti di regolazione degli impianti .....	"	68
<b>4.12.</b>	Interventi per l'aumento di efficienza energetica .....	"	69
<b>4.13.</b>	Analisi costi benefici .....	"	70
<b>4.14.</b>	Limiti nell'accuratezza dello studio .....	"	71
<b>4.15.</b>	Audit energetico orientato al solo contenimento dei costi .....	"	72
<b>5.</b>	<b>Contenimento dei costi energetici</b>		
	– <b>il mercato libero dell'energia</b> .....	"	73
<b>5.1.</b>	Premesse .....	"	73
<b>5.2.</b>	La liberalizzazione del mercato energetico elettrico .....	"	74
<b>5.3.</b>	Mercato libero e servizio di maggior tutela .....	"	76
<b>5.4.</b>	Tariffe ed audit energetico elettrico .....	"	77
<b>5.5.</b>	Contributo da fonti rinnovabili .....	"	82
<b>5.6.</b>	Mercato libero dell'energia e pubbliche amministrazioni .....	"	84
<b>6.</b>	<b>Esempio di audit energetico elettrico</b>		
	<b>per il contenimento dei consumi</b> .....	"	85
<b>6.1.</b>	Premesse .....	"	85
<b>6.2.</b>	Obiettivi da raggiungere .....	"	85
<b>6.3.</b>	Procedura adottata .....	"	86
<b>6.4.</b>	Descrizione del sistema edificio-impianti .....	"	88
<b>6.4.1.</b>	Carichi luce corridoi .....	"	97

6.4.2.	Carichi luce servizi igienici .....	p.	98
6.4.3.	Carichi luce disimpegni e scale .....	"	98
6.4.4.	Carichi luce illuminazione esterna.....	"	99
6.4.5.	Carichi luce illuminazione area tecnica locali seminterrati.....	"	99
6.4.6.	Carichi zona uffici .....	"	99
6.4.7.	Carichi centrale termica e idrica.....	"	100
6.4.8.	Carichi all'interno degli alloggi .....	"	100
6.4.9.	Ascensori.....	"	101
6.5.	Misure illuminotecniche.....	"	101
6.6.	Misure voltamperometriche sul quadro elettrico generale .....	"	102
6.7.	Analisi della distribuzione dei consumi .....	"	111
6.8.	Stima dei consumi per solo raffrescamento estivo.....	"	114
6.9.	Ulteriori analisi dei dati disponibili.....	"	115
6.10.	Sintesi dei risultati e valutazione costi-benefici di ciascun intervento .....	"	119
6.10.1.	Carichi luce corridoi .....	"	119
6.10.2.	Carichi luci scale e disimpegni .....	"	121
6.10.3.	Carichi luce servizi igienici .....	"	123
6.10.4.	Carichi luce locali tecnici.....	"	125
6.10.5.	Carichi zona uffici .....	"	125
6.10.6.	Carichi centrali termiche ed idriche.....	"	127
6.10.7.	Altri interventi proposti.....	"	127
6.11.	Opportunità di cambio di operatore .....	"	129
<b>7.</b>	<b>Esempio di audit energetico elettrico</b>		
	<b>per il contenimento dei costi .....</b>	"	132
7.1.	Presentazione del caso studio.....	"	132
7.2.	Premessa .....	"	132
7.3.	Elenco per macro gruppi delle utenze corrispondenti alla partita IVA dell'Ente.....	"	133
7.4.	Descrizione delle modalità di funzionamento delle macchine alimentate dalle principali utenze .....	"	142
7.5.	Utenze prive di misurazioni recenti da parte dell'Ente Distributore .....	"	147
7.6.	Utenze con costi annui superiori a 4.000 €.....	"	149
7.6.1.	Analisi dei consumi divisi per fascia oraria .....	"	154
7.6.2.	Tipologie di tariffe attualmente applicate .....	"	155
7.6.3.	Confronto dei costi a seguito di modifica della tariffazione.....	"	157
7.6.4.	Possibili economie ottenibili con modifica del profilo di utilizzo dei carichi .....	"	158
7.6.5.	Riepilogo economie da trasferimento carichi .....	"	161
7.7.	Utenze con consumi annui medio-bassi e costi annui inferiori a 4.000 € .....	"	162

7.7.1.	Analisi dei consumi divisi per fascia oraria .....	p.	163		
7.7.2.	Confronto dei costi a seguito di modifica della tariffazione.....	"	165		
7.8.	Utenze con consumi annui minimi o nulli .....	"	166		
7.9.	Conclusioni.....	"	168		
<b>Appendice normativa</b>					
	Direttiva 2003/54/CE .....	"	171		
<b>Installazione del software allegato</b>					
	Introduzione .....	"	192		
	Requisiti minimi hardware e software .....	"	192		
	Download del software e richiesta della password di attivazione.....	"	192		
	Installazione e attivazione del software .....	"	193		
<b>Bibliografia e riferimento normativi</b> .....				"	196
<b>Licenza d'uso</b> .....				"	199
<b>Codici per il download del software e per la richiesta della password di attivazione</b> .....				"	200



---

---

## Prefazione

Energia elettrica, energia del futuro? Sicuramente sì. Quella separazione da sempre tra usi elettrici ed usi termici, cui corrispondevano come fonti energetiche l'elettricità e i combustibili, potrebbe non esserci più dal momento che gli usi termici, utilizzando apparecchiature "efficienti" potrebbero essere coperti dall'energia elettrica.

Il rapido incremento di efficienza delle pompe di calore, ad esempio, renderà sempre più convenienti queste apparecchiature, e se poi l'energia elettrica necessaria viene fornita dalle tecnologie fotovoltaiche, o comunque da altre forme di rinnovabili elettriche, ecco che il cerchio si chiude.

La combinazione pompa di calore-impianto fotovoltaico rappresenta oramai uno standard nella progettazione di edifici ad alte prestazioni energetiche, al punto che è difficile immaginare un edificio completamente autonomo, o Zero Energy Building (ZEB), con soluzioni che non vedano l'energia elettrica, con l'opzione di scambio con la rete, come soluzione unica al problema di azzeramento del bilancio energetico.

Non è solo il settore edilizio ad essere interessato a questo passaggio da combustibili di origine fossile a elettricità: anche il settore dei trasporti, dopo tanti anni di stabilità tecnologica, fatta di soli motori endotermici, sta cambiando, e la mobilità elettrica sembra proprio la risposta più convincente alla questione concreta dell'inquinamento delle aree del territorio ad alta concentrazione.

Rispetto alle altre fonti energetiche termiche, l'elettricità ha indubbiamente una marcia in più: con questa forma pregiata di energia, infatti, è possibile fare praticamente tutto, dalla climatizzazione degli edifici alla mobilità, dalla alimentazione degli elettrodomestici o delle apparecchiature alla cottura dei cibi: gli edifici di nuova generazione diventano sempre di più edifici gas-free nei quali tutto è elettrico.

La generazione di energia elettrica, quando non si utilizzano le tecnologie rinnovabili, ci impone comunque di utilizzare dei combustibili di origine fossile che ovviamente impatto ambientale, tuttavia il fatto di avere potenzialmente distanti il punto in cui l'energia viene generata dai tanti punti in cui viene utilizzata è un enorme vantaggio: si riducono notevolmente le emissioni nelle aree nelle quali è maggiore la concentrazione antropica.

Un futuro elettrico, tuttavia, non ci deve far dimenticare che esiste anche un presente ed un passato nei quali l'energia elettrica, al pari delle altre forme di energia, nelle sue più diverse applicazioni, non viene utilizzata in modo efficiente.

Immaginare un futuro energy-free, nel quale l'energia elettrica avrà una funzione di vettore tra una produzione fortemente caratterizzata dall'uso sempre più intenso

di fonti energetiche rinnovabili (fotovoltaico, eolico, idroelettrico), e le più disparate utenze sempre più efficienti, quindi con consumi ridotti a parità di servizio offerto, è certamente possibile ma a una condizione: che tutto ciò che già abbiamo sia rivisto e riqualificato e rigenerato dal punto di vista energetico.

Ed è proprio in questo contesto che il tecnico specialistico, l'energy auditor, svolge un ruolo chiave nella ricerca di quei potenziali di risparmio che ci consentono di ridurre sempre di più gli sprechi e di accedere alla fonte energetica rinnovabile più diffusa, disponibile e spesso economica: l'energia risparmiata.

L'innovazione tecnologica nel settore delle apparecchiature di regolazione, controllo e utilizzazione dell'energia elettrica, e più in generale nei settori impiantistici ad correlati, è stata impressionante, anche in risposta alle diverse Direttive europee che cercano di stimolare e di accelerare il cambiamento. E molti concordano sul fatto che il futuro ci porterà ancora tante novità, perché lo sviluppo delle Smart Cities, altro tema dominante, in fondo passa da qui.

Tutta questa innovazione tecnologica, tuttavia, deve essere sfruttata con competenza, con perizia, attraverso un approccio globale multidisciplinare che solo l'energy auditor è in grado di garantire e gestire.

La diagnosi energetica, che a noi piace chiamare energy audit per non tradire la sua origine anglosassone, è uno strumento potente, è la vera leva del cambiamento. Attraverso l'audit si individuano le caratteristiche impiantistiche, si analizzano le modalità d'uso, si evidenziano le inefficienze che possono essere rimosse con interventi di retrofit, nel nostro caso elettrico, e che vengono attentamente valutati sia sul piano tecnico che su quello economico. L'energy audit non è uno studio fine a se stesso, è l'analisi del problema e la risposta concreta per una sua definitiva e conveniente soluzione.

L'efficacia di questo strumento, tuttavia, sta nel metodo attraverso il quale viene applicato. Molti parlano di energy audit, termine diventato anche questo di moda, ma in mancanza di linee guida applicative e di "metodo" effettuare un audit vuol dire fare un bel lavoro o dare impressione di farlo senza concretezza e professionalità, cosa che purtroppo accade.

Ed è qui che entra in gioco l'opera di Cesare Caramazza che propone ed applica, anche attraverso una serie di esempi pratici, una procedura di audit energetico elaborata in modo specifico per il settore elettrico. Il lavoro fatto, contenuto in questo volume che è un manuale, quindi uno strumento, riesce finalmente a colmare un vuoto nella letteratura tecnico-scientifica del settore. Le procedure di energy audit più consolidate, infatti, coprono solo in parte le questioni legate ad un corretto uso dell'energia elettrica. Qui, al contrario, si entra nello specifico si propongono metodi, si offrono soluzioni, si fornisce anche un compendio teorico che i tecnici del settore sicuramente avranno modo di apprezzare.

Il volume, che ho avuto privilegio di leggere prima ancora che fosse dato alle stampe, mi è piaciuto e mi ha convinto. Cesare, che oltre ad essere un collega è anche un amico che stimo sul piano umano prima ancora che su quello professionale, in questo lavoro ci ha messo la sua competenza, la sua esperienza, la sua capacità nell'andare a fondo dei problemi, nel trovare la soluzione più corretta per risolverli, passando attraverso un esame accurato ed un confronto tra tutte le soluzioni possibili. Ma soprattutto ci ha messo il suo stile, il suo modo di essere sobrio e pragmatico pacato ed elegante

nell'affrontare una materia tecnica per la quale ha dimostrato da sempre una grande passione che traspare tra le righe.

Ringrazio quindi Cesare per questo sforzo, nella convinzione che i lettori troveranno nei contenuti di questo manuale tanta energia per alimentare quella che forse è la fonte energetica più importante: la conoscenza delle cose che ci fa essere professionali, operativi e concreti.

Giuliano Dall'O'  
*Professore al Politecnico di Milano*



---

---

## Capitolo 1

# Elementi di elettrotecnica

### 1.1 Premesse

Il presente capitolo introduttivo non ha le pretese di avere elevate qualità formative, ma intende fornire agli addetti ai lavori che dovessero avere una formazione elettrotecnica modesta, quali possono essere architetti, ingegneri con formazione diversa, altri tecnici, energy manager ed energy auditor in generale, gli strumenti che consentano una comprensione dei principi base di elettrotecnica che regolano i fenomeni elettrici e che possono determinare variazioni significative sui consumi energetici.

Verranno altresì forniti gli strumenti cognitivi necessari per una comprensione delle conseguenze che possono esserci negli interventi di modifica degli impianti elettrici (cadute di tensione in linea, correnti di servizio di conduttori, correnti nominali e di corto circuito) al fine di scongiurare il rischio che interventi che conseguano un aumento dell'efficienza energetica di un impianto elettrico (quale potrà essere ad esempio lo spostamento in posizione baricentrica di una cabina elettrica MT/BT) possano avere come risultato la non conformità alle norme dell'impianto stesso.

Nel prosieguo del capitolo e nei capitoli successivi verranno utilizzate solo le formule strettamente necessarie alla comprensione del peso che possono avere i vari parametri in un fenomeno, senza giustificare la provenienza o il nome del teorema a cui corrispondono.

Si rimanda a testi specifici per maggiori approfondimenti in materia e per una trattazione rigorosa dei vari aspetti.

### 1.2 La corrente continua e la corrente alternata

Alcuni impianti di produzione di energia elettrica sono caratterizzati da produzione in corrente continua, ad esempio gli impianti fotovoltaici.

Il principio di funzionamento di un impianto fotovoltaico prevede che un wafer (una "fettina") di silicio drogato venga colpito da una radiazione solare, dopo tale irraggiamento si verifica una separazione di cariche elettriche.

Tale separazione di cariche elettriche, chiusa in un circuito, dà luogo al passaggio di una corrente continua, variabile senza inversione di direzione (quindi senza cambio di segno) in funzione dell'intensità della radiazione solare.

Il modo oggi più diffuso per produrre, trasportare e consumare energia elettrica è invece la corrente alternata, tanto da costringere gli impianti che producono energia in

corrente continua a trasformare tale corrente continua in alternata attraverso gli inverter.

Le motivazioni per la preferenza della corrente alternata sono tante, principalmente si possono sottolineare la maggiore semplicità e robustezza delle macchine generatrici in corrente alternata e delle macchine utilizzatrici in corrente alternata e la maggiore semplicità di trasformazione del livello di tensione che consente, sfruttando i fenomeni di elettromagnetismo connessi con le correnti variabili, quale ovviamente è la corrente alternata, di trasmettere energia a tensioni più elevate con conseguente riduzione delle perdite in linea (il legame livello di tensione-perdite verrà approfondito nei seguenti capitoli).

La corrente alternata ha un andamento caratteristico di tipo sinusoidale, con un picco positivo ed uno negativo tra di loro uguali.

La velocità di variazione della corrente tra i vari valori che può assumere (zero, massimo positivo, zero, massimo negativo, nuovamente zero) si misura in Hertz.

Un Hertz corrisponde ad una variazione completa della corrente, quindi il compimento di un periodo, in un secondo.

La rete elettrica italiana è caratterizzata da un valore di frequenza di 50 Hz, quindi nelle reti italiane la corrente alternata compirà 50 periodi completi ogni secondo.

Quando nei componenti elettrici, ad esempio un cavo o un interruttore, si rinvengono dei valori di corrente (la portata del cavo, la corrente nominale dell'interruttore) tale valore di corrente non farà riferimento al picco di corrente, ma ad un valore di corrente "equivalente" detto valore efficace di corrente.

Il valore efficace della corrente alternata è in definitiva il valore che dovrebbe assumere una corrente continua per produrre gli stessi effetti termici della corrente alternata.

Il valore efficace della corrente alternata è pari al picco di corrente della sinusoide diviso per radice di due, quindi 0,707 volte il picco.

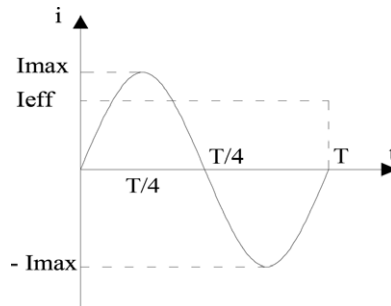


Figura 1.1 Andamento sinusoidale della corrente e suo valore efficace

### 1.3 Circuiti resistivi monofasi

La tensione di esercizio della rete elettrica nazionale in bassa tensione è 230 V per impianti monofase e 400 V per impianti trifase.

Un impianto monofase è un impianto alimentato e costituito da due soli conduttori, una fase ed un neutro.

Un impianto trifase è costituito generalmente da 4 conduttori (con la sola eccezione di impianti di luoghi particolari quali parti di ospedali), tre fasi ed un neutro.

Le tre fasi avranno una tensione di 230 V rispetto al neutro, chiamata tensione di

fase, mentre tra loro vi sarà una tensione di 400 V, chiamata concatenata, nel caso di sistema trifase equilibrato ideale sul neutro non circolerà corrente.

Per il caso monofase la relazione tra la tensione e la corrente è data per i casi di carichi resistivi dalla legge di Ohm, la corrente che circolerà in una linea elettrica ai capi della quale è applicata una tensione è proporzionale alla tensione stessa ed è legata ad essa dal carico elettrico alimentato dalla linea (trascurando la resistenza elettrica della linea):

$$V = R I$$

dove

- V è la tensione in volt (V);
- I è la corrente in ampere (A);
- R è la resistenza in ohm ( $\Omega$ ).

Quanto descritto è valido anche in corrente continua in quanto non intervengono fenomeni magnetici legati alla variazione della corrente che influenzano il circuito elettrico.

Ogni linea elettrica è caratterizzata da una propria resistività, che è la resistenza chilometrica che offre la linea al passaggio della corrente, variabile in funzione di sezione, modalità di posa e materiale costituente la linea.

In tali casi le perdite che si avranno in una linea elettrica per effetto joule (riscaldamento della stessa) saranno proporzionali al quadrato della corrente ed alla resistenza della stessa:

$$P = R_{\text{linea}} I^2$$

dove

- P è la potenza persa in linea espressa in watt (W).

### 1.4 Circuiti induttivi ed ohmico induttivi monofasi

Nei circuiti in corrente alternata come descritto vi sono diversi cicli completi di variazione del segno della corrente ogni minuto (per i 50 Hz italiani vi saranno 50 variazioni complete di corrente ogni minuto). Tali variazioni instaurano dei fenomeni magnetici di segno variabile che provocano delle forze elettromotrici dovute ad autoinduzione nel circuito interessato, pertanto le correnti che interessano le linee non sono più determinate dalla sola tensione applicata, ma anche da tali fenomeni autoinduttivi.

Il circuito interessato da corrente variabile non sarà più caratterizzato solo da una resistenza, ma ad esso verrà associata anche un'induttanza L che rappresenterà i fenomeni autoinduttivi descritti.

La forza elettromotrice (di seguito f.e.m.) di autoinduzione però non risulterà in fase con la corrente circolante, ovvero non ci sarà corrispondenza tra l'istante in cui si ha il picco di corrente e l'istante in cui si ha il picco di f.e.m. autoindotta, ma sarà sfasata di  $90^\circ$  rispetto ad essa, il picco di questa f.e.m. quindi verrà raggiunto dopo  $\frac{1}{4}$  di periodo rispetto al picco della corrente.

La tensione risultante che sarà applicata al circuito avrà uno sfasamento compreso tra  $0^\circ$  (tensione applicata) e  $90^\circ$  (f.e.m. per autoinduzione), con una somma delle due grandezze di tipo vettoriale (per la teoria fasoriale si rimanda a testi specifici, di seguito ne verrà data una breve e superficiale esposizione). A tal proposito si ricorda come un vettore sia caratterizzato da un modulo (l'intensità, il valore che assume, coincidente con la sua lunghezza nella rappresentazione grafica, che sarà pari alla misurazione che si potrebbe fare attraverso strumenti di misura di una grandezza elettrica), da una direzione e da un verso. In genere tutti i circuiti elettrici presentano caratteristiche sia induttive che resistive, le caratteristiche induttive daranno luogo alla definizione di una reattanza che lega la corrente circolante alla componente della tensione sfasata rispetto alla corrente circolante. Se si rappresentano le grandezze in gioco in un piano complesso, si potrà avere uno schema estremamente semplificato e rappresentativo della situazione come in figura.

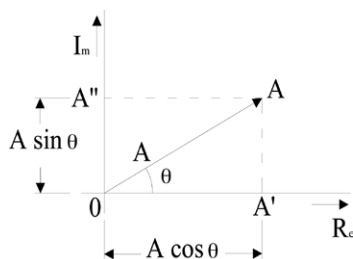


Figura 1.2 Rappresentazione vettoriale di una grandezza

Nel piano verranno rappresentati dei vettori, quindi caratterizzati da modulo, direzione e verso, che devono essere immaginati come rotanti alla stessa velocità attorno all'origine del piano complesso, quindi tra loro non si modificano gli angoli, la velocità di rotazione sarà corrispondente alla frequenza.

Tali vettori rotanti saranno rappresentati convenzionalmente all'istante  $t=0$ .

La loro rappresentazione numerica può essere effettuata attraverso un numero reale ed uno immaginario<sup>1</sup> o attraverso il valore del modulo (quindi la lunghezza del vettore) e l'angolo rispetto all'asse reale.

$$\mathbf{A} = A_{\text{Re}} + j A_{\text{Im}} = A e^{j\theta}$$

Convenzionalmente le formule di elettrotecnica che riguardano grandezze fasoriali, quindi caratterizzate da un modulo e da uno sfasamento (o da un numero complesso),

1 Non si approfondisce la teoria dei numeri complessi, per la quale si rimanda a testi specifici, si precisa unicamente che nel piano complesso costituito da valori reali rappresentati lungo l'asse delle ascisse e valori immaginari lungo l'asse delle ordinate, la lettera  $j$  che precede il valore immaginario indica un valore sull'asse positivo delle ordinate, quindi se si ha un numero complesso con parte immaginaria positiva la sua componente immaginaria sarà  $90^\circ$  in anticipo rispetto all'asse reale in una rappresentazione con rotazione antioraria, se si ha un numero complesso con parte immaginaria negativa ( $-j$ ) la sua componente immaginaria sarà in ritardo di  $90^\circ$  rispetto all'asse reale.



vedranno tali grandezze fasoriali indicate con delle linee o dei punti sopra le lettere, o ancora saranno lettere in neretto, questa ultima sarà la convenzione adottata nel presente volume.

In un circuito puramente resistivo i vettori tensione e corrente saranno entrambi disposti sull'asse orizzontale, la loro relazione sarà semplicemente:

$$\mathbf{V} = R \mathbf{I}$$

dove  $R$  è la resistenza del circuito e  $\mathbf{V}$  ed  $\mathbf{I}$  sono i fasori rappresentativi di tensione e corrente, che nel caso specifico non saranno sfasati, il cui modulo corrisponde ai valori efficaci delle tensioni e delle correnti sinusoidali che si misurerebbero strumentalmente.

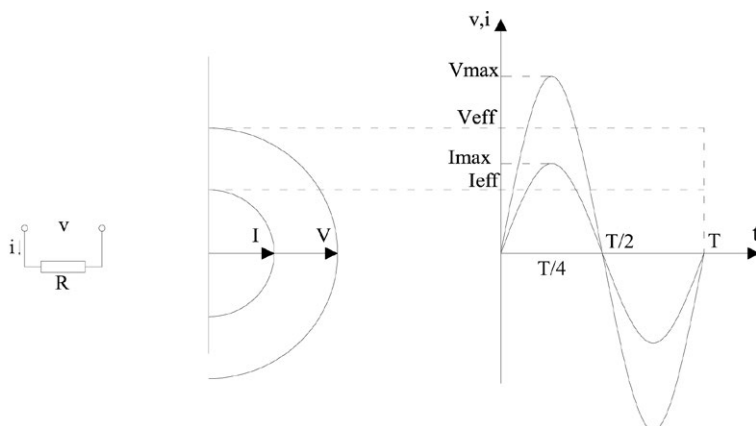


Figura 1.3 Circuito resistivo, rappresentazione vettoriale ed andamento istantaneo delle grandezze

In un circuito puramente induttivo la tensione si potrà disporre sull'asse orizzontale, la corrente sarà rispetto ad essa in ritardo di  $90^\circ$  (in quadratura in ritardo).

I valori efficaci della tensione e della corrente, coincidenti con il valore dei moduli nella rappresentazione vettoriale (la lunghezza dei vettori nella rappresentazione grafica) saranno tra loro legati attraverso la reattanza  $X$ , che sarà l'induttanza del circuito moltiplicata per  $2\pi$  e per la frequenza della corrente:

$$V_L = L 2\pi f I = X I$$

La rappresentazione fasoriale della relazione di cui sopra sarà la seguente:

$$\mathbf{V} = j X \mathbf{I}$$

In coerenza con quanto precisato nella precedente nota si fa osservare come nel caso specifico la tensione risulti  $90^\circ$  "in anticipo" rispetto alla corrente, rappresentazione dei vettori di figura 1.4, ed infatti la relazione tra fasori vedrà la presenza della componente immaginaria  $j$  con il segno positivo che indica che il fasore della tensione avrà un angolo di  $90^\circ$  rispetto alla corrente ruotando in senso antiorario a partire da essa.

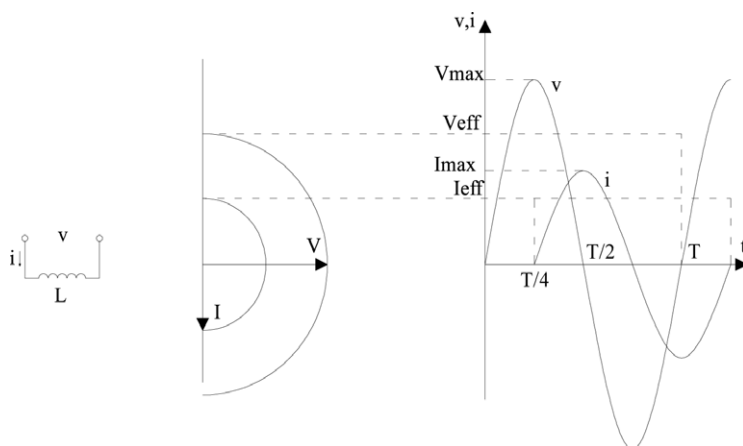


Figura 1.4 Circuito induttivo, rappresentazione vettoriale ed andamento istantaneo delle grandezze

Il caso di un circuito ohmico induttivo vedrà una componente della corrente  $I$ , sia essa  $I_R$ , in fase con la tensione, il cui valore è pari al prodotto della corrente per la resistenza, ed una componente sfasata di  $90^\circ$  (in quadratura in ritardo),  $I_L$ , legata alla  $I$  dalla reattanza  $X$ .

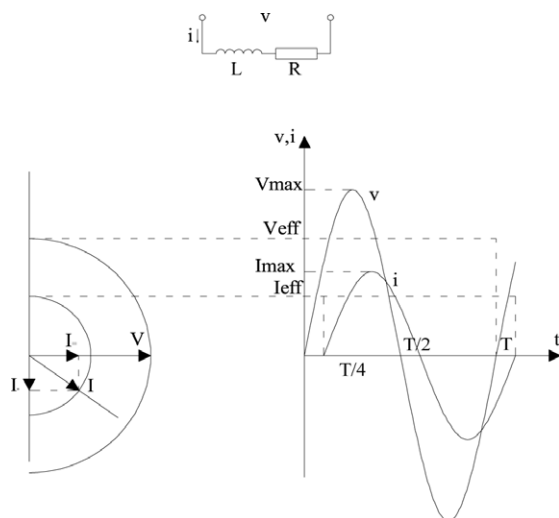


Figura 1.5 Circuito ohmico induttivo, rappresentazione vettoriale ed andamento istantaneo delle grandezze

Il valore  $I$  della corrente (il modulo del vettore rotante rappresentato nel diagramma) non sarà altro che l'ipotenusa del triangolo rettangolo i cui cateti sono  $I_R$  e  $I_L$ :

$$I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$$

In definitiva nei casi più comuni la corrente misurata in un circuito attraverso strumenti sarà il valore della corrente  $I$ , che potrà poi essere scomposta in una componente in fase con la tensione ed in una in quadratura con essa.

Volendo riportare tutto al caso puramente resistivo, si può definire un unico fattore che legghi il modulo della tensione  $V$  al modulo della corrente  $I$ :

$$V = Z I$$

$Z$  sarà l'impedenza caratteristica del circuito e sarà pari alla radice quadrata della somma dei quadrati di resistenza e reattanza, secondo la formula riportata di seguito.

$$Z = \sqrt{(R^2 + X^2)}$$

La rappresentazione fasoriale della formula che lega la tensione alla corrente potrà essere la seguente:

$$\mathbf{V} = R\mathbf{I} + jX\mathbf{I} = (R + jX)\mathbf{I}$$

e quindi, avendo un componente caratterizzato da una parte reale ed una complessa.

$$\mathbf{Z} = R + jX$$

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z}\mathbf{I}$$

Normalmente i circuiti elettrici interessati da corrente alternata sono caratterizzati da una reattanza di tipo induttivo ed una di tipo capacitivo, l'impedenza tipica di un circuito quindi terrà conto di tutti e tre i fenomeni (resistivo, induttivo e capacitivo), ma tipicamente i fenomeni di tipo induttivo supereranno gli aspetti capacitivi.

Lo sfasamento tra tensione e corrente (che si ricorda essere il non allineamento delle due sinusoidi dovuto ad effetti induttivi) è nella rappresentazione dei vettori rotanti un angolo il cui coseno viene definito fattore di potenza ( $\cos \varphi$ ), l'argomento verrà nei successivi capitoli ampiamente approfondito. Si trascurano nel presente trattato i circuiti ohmico capacitivi ricordando che l'obiettivo è unicamente quello di fornire elementi sufficienti a tecnici che debbano effettuare energy audit elettrici.

Tuttavia, per una migliore comprensione della procedura di rifasamento che di seguito verrà descritta, si precisa che il segno dello sfasamento tra tensione e corrente in circuiti ohmico capacitivi è di segno opposto rispetto al caso induttivo, quindi un circuito in cui vi fossero induttanze e capacità tali che le reattanze corrispondenti risultassero identiche, sarà un circuito completamente rifasato ed avrà una tensione ed una corrente perfettamente in fase, quale è il caso di un circuito puramente resistivo.

### 1.5 Potenza attiva

In un sistema a corrente continua la potenza è data dal prodotto della tensione ai capi del circuito per la corrente che lo attraversa e si misura in watt (W).

In un sistema a corrente alternata con corrente e tensione perfettamente in fase (caso resistivo) la potenza sarà ancora data dal prodotto tra tensione e corrente, considerando in questo caso i valori efficaci delle due grandezze (come detto in un circuito a corrente alternata le grandezze che si rinvergono tra le caratteristiche dei componenti, portata di cavi, corrente nominale degli interruttori, tensione nominale, ecc., sono i valori efficaci di tali grandezze).

Quando si dovesse avere un circuito di tipo ohmico induttivo, si definisce potenza attiva il prodotto della tensione per la componente della corrente in fase con essa.

La potenza attiva sarà la potenza effettivamente disponibile per compiere un lavoro.

### 1.6 Potenza reattiva

Nell'ipotesi limite di un circuito puramente induttivo la resistenza del circuito sarà pari a zero e la formula della potenza assumerà un valore tale da variare il proprio valore con frequenza doppia rispetto alla corrente.

Ne consegue che in mezzo periodo della corrente (in cui la corrente ad esempio assume tutti valori positivi o tutti valori negativi) la potenza avrà compiuto un ciclo intero, con un conseguente valore medio nullo. Il fatto che nel circuito la resistenza è nulla comporta che non vi è dissipazione di energia per effetto joule, in tale circuito ideale la potenza attiva sopra definita avrà valore pari a zero. Per far comprendere tale caso limite in cui vi è un impegno di corrente ma non vi è una potenza attiva per compiere un lavoro, si consideri che il circuito puramente induttivo accumulerà una energia nel campo magnetico dell'induttanza, tale energia superato il picco massimo di corrente verrà "restituita" dal campo magnetico dell'induttanza, con un segno della potenza negativo durante la fase decrescente positiva della corrente. Successivamente l'induttanza si ricaricherà al crescere negativo della corrente e si scaricherà al decrescere dei valori negativi della corrente, da cui la variazione con frequenza doppia rispetto alla corrente.

In figura è rappresentato il caso descritto, avendo indicato con  $q$  l'andamento del valore istantaneo della potenza reattiva, che in un periodo della tensione compie un doppio periodo completo.

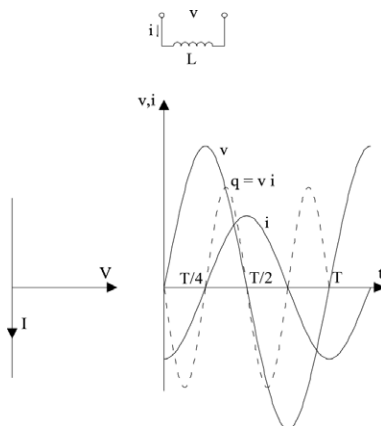


Figura 1.6 Rappresentazione dell'andamento istantaneo della potenza reattiva in un circuito induttivo