

# Capitolo 9

## La conversione CA -CC

### 9.1 Convertitori CA-CC

Nella maggior parte delle applicazioni elettriche, l'ingresso di potenza fornito dall'ente erogatore di energia è una sorgente di tensione di tipo sinusoidale a 50 o 60 Hz. Tale ingresso per poter essere utilizzato negli azionamenti elettrici deve essere spesso convertito in una sorgente continua. Le finalità della conversione possono essere due:

1. ottenere una tensione continua
2. ottenere una corrente continua

Nel primo caso la conversione avviene per la maggior parte attraverso ponti raddrizzatori a diodi non controllati; affinché la tensione in uscita dal raddrizzatore presenti la minor oscillazione possibile, viene tipicamente connessa come filtro al lato in corrente continua una capacità di valore elevato.

Tale soluzione presenta naturalmente il vantaggio di un costo estremamente contenuto soprattutto se il raddrizzatore è direttamente connesso alla linea di alimentazione senza la presenza di un trasformatore in ingresso, ma ha lo svantaggio di presentare una elevata distorsione delle correnti assorbite.

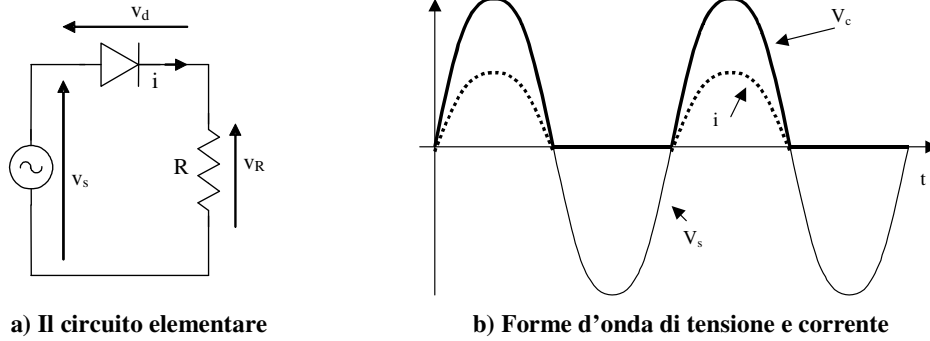
Nel secondo caso è necessario ricorrere a ponti controllati che alimentano un carico induttivo e quindi a soluzioni decisamente più costose.

### 9.2 Raddrizzatori elementari non controllati

Per introdurre i principi della conversione CA-CC con diodi non controllati verranno analizzati nel seguito alcuni semplici convertitori che serviranno ad evidenziare caratteristiche di funzionamento che si ritroveranno anche in convertitori più complessi.

#### 9.2.1 Convertitore monofase a semplice semionda

Il circuito monofase a semplice semionda è costituito da una sola valvola a conduzione unidirezionale posta in serie ad un generico carico. Il circuito è alimentato da una tensione alternata sinusoidale. Tale configurazione circuitale ha un limitato interesse pratico per le limitazioni intrinseche che presenta, tuttavia il suo studio mette in luce una serie di peculiarità tipiche per comprendere i circuiti che trovano ampia applicazione.



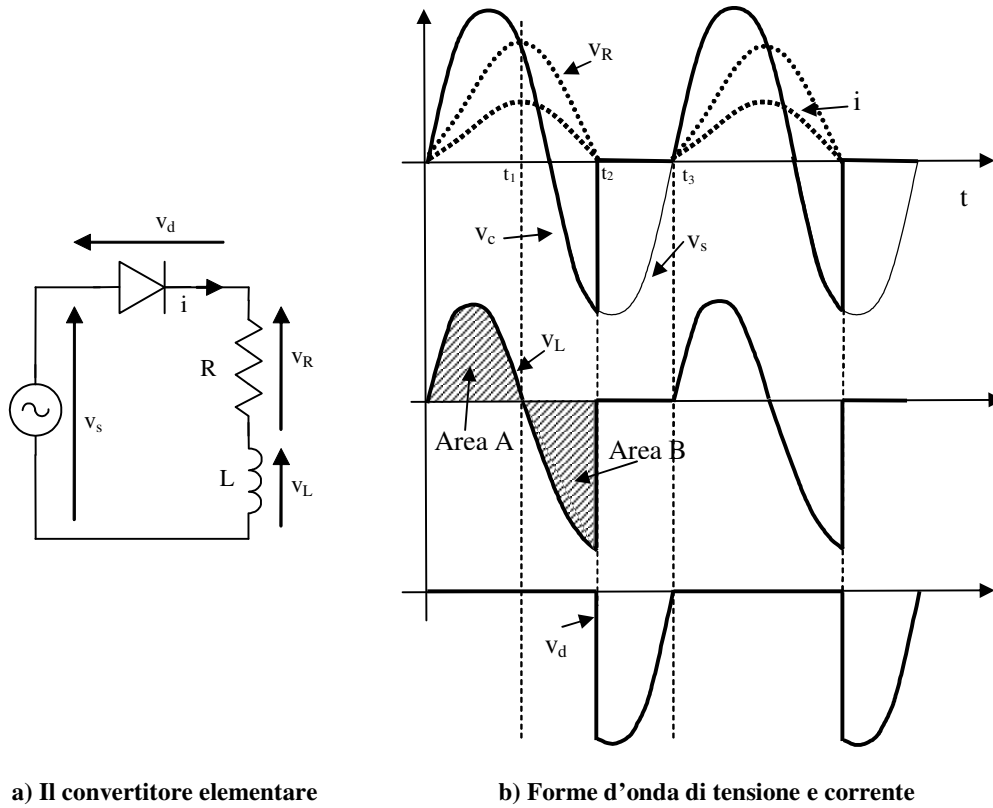
**Figura 9-1. Il convertitore elementare con carico resistivo**

Si consideri il circuito rappresentato in Figura 9-1a con la sorgente sinusoidale  $v_s$ . Nel caso di carico **puramente resistivo** le forme d'onda sono quelle rappresentate in Figura 9-1b. Come si può notare sia la tensione del carico  $v_c$  che la corrente  $i$  presentano un valore medio diverso da zero. Tale valore medio compare anche nella corrente erogata dal generatore. Ora, se l'alimentazione provenisse, come spesso accade, da un trasformatore, tale componente continua potrebbe portarlo in saturazione, compromettendo il buon funzionamento del sistema. E' per questa ragione che il raddrizzatore monofase a semplice semionda non è normalmente usato.

Si consideri ora il circuito rappresentato in Figura 9-2 in cui il carico è **ohmico-induttivo**. All'istante  $t=0$  il diodo si polarizza direttamente e comincia a condurre. La corrente nel circuito è governata dall'equazione (5.1).

$$v_s = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (5.1)$$

Fino a quando la tensione  $v_s$  della sorgente è maggiore della tensione sulla resistenza  $v_R$  la corrente cresce e l'induttore accumula energia. Quando la tensione sulla resistenza supera la tensione di alimentazione (istante  $t_1$ ) la tensione sull'induttanza diventa negativa e quindi la corrente comincia a diminuire finché si annulla all'istante  $t_2$ ; in questo istante il diodo entra in stato di blocco.) (Figura 9-2b).



a) Il convertitore elementare

b) Forme d'onda di tensione e corrente

Figura 9-2. Il convertitore elementare con carico ohmico-induttivo

L'istante di tempo  $t_2$ , al quale il diodo smette di condurre, può essere ottenuto dall'equazione dell'induttore riscritta separando le variabile  $dt$  e  $di$  (5.2).

$$\frac{1}{L} v_L dt = di \quad (5.2)$$

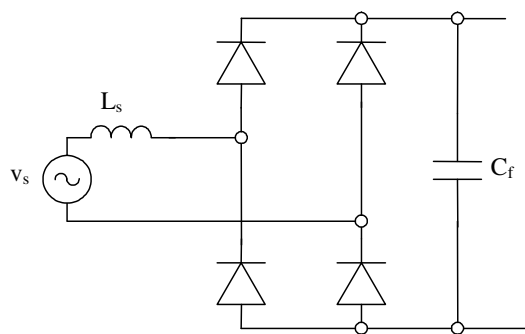
Integrando tra 0 e  $t_2$  e riconoscendo che  $i(0) = i(t_2) = 0$  si ottiene l'equazione (5.3) che può essere interpretata come (5.4): La corrente si annulla quando le due aree sono uguali.

$$\frac{1}{L} \int_0^{t_2} v_L dt = \int_{i(0)}^{i(t_2)} di = 0 \rightarrow \int_0^{t_2} v_L dt = \int_0^{t_1} v_L dt + \int_{t_1}^{t_2} v_L dt = 0 \quad (5.3)$$

$$\text{Area A} - \text{Area B} = 0 \quad (5.4)$$

### 9.3 Raddrizzatore monofase a ponte non controllato

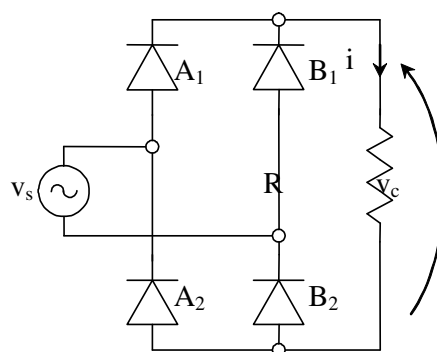
La struttura tipica del raddrizzatore a ponte monofase utilizzato negli azionamenti elettrici è rappresentata in Figura 9-3. Si può notare la presenza di un condensatore di elevata capacità lato corrente continua, mentre la sorgente di potenza, in generale, può essere modellata come una sorgente ideale di tensione sinusoidale  $v_s$  con un'impedenza serie costituita da una sola induttanza  $L_s$ . Tale induttanza rappresenta il modello semplificato della linea e dell'eventuale trasformatore di alimentazione e/o di un induttore di filtro.



**Figura 9-3. Raddrizzatore monofase a ponte**

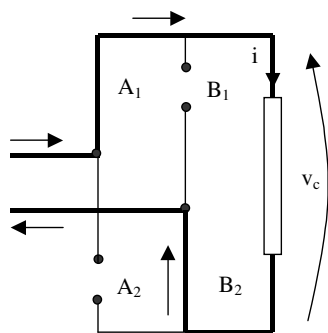
### 9.3.1 Circuito ideale con $L_s = 0$ e carico resistivo

Una prima approssimazione del funzionamento del raddrizzatore la si può ottenere studiando il circuito di Figura 9-4: il carico è costituito esclusivamente resistivo ( $C_f=0$ ) e in ingresso si trascura l'induttanza  $L_s$ .

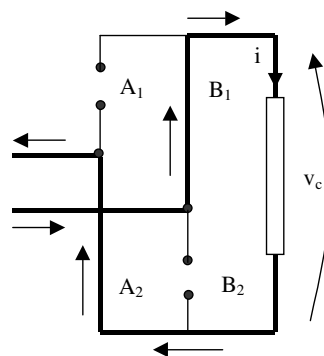


**Figura 9-4. Raddrizzatore ideale con  $L_s = 0$**

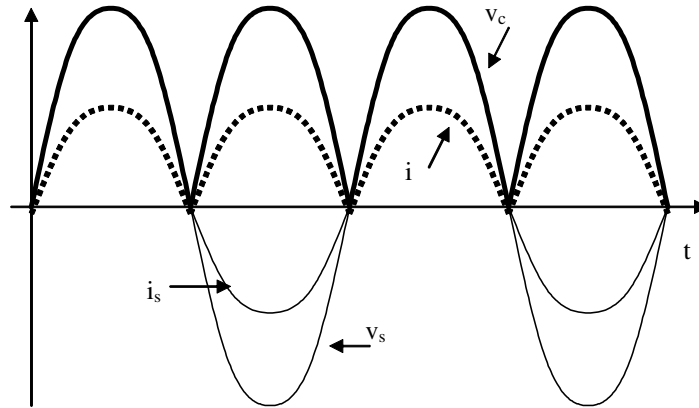
Nella configurazione proposta saranno in conduzione il diodo superiore che si trova con il potenziale anodico maggiore e il diodo inferiore a potenziale catodico minore (si veda Figura 9-5 in cui i diodi in conduzione sono rappresentati da un corto circuito, mentre quelli in stato di blocco come circuiti aperti). Gli andamenti delle grandezze tensione e corrente sono rappresentati in Figura 9-6.



**a) Semionda positiva di  $v_s$**



**b) Semionda negativa di  $v_s$**

**Figura 9-5. Schema di conduzione delle valvole****Figura 9-6. Andamenti di tensione e corrente**

Il valore medio della tensione sul carico può essere ottenuta integrando l'andamento della tensione  $v_s$  in un semiperiodo come indicato in (5.5)

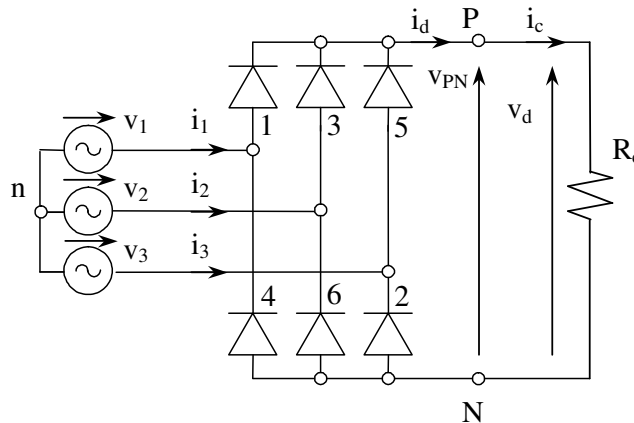
$$V_{do} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} \sqrt{2} V_s \sin \omega t \, dt = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_s \cong 0.9 V_s \quad (5.5)$$

## 9.4 Raddrizzatore trifase a ponte non controllato

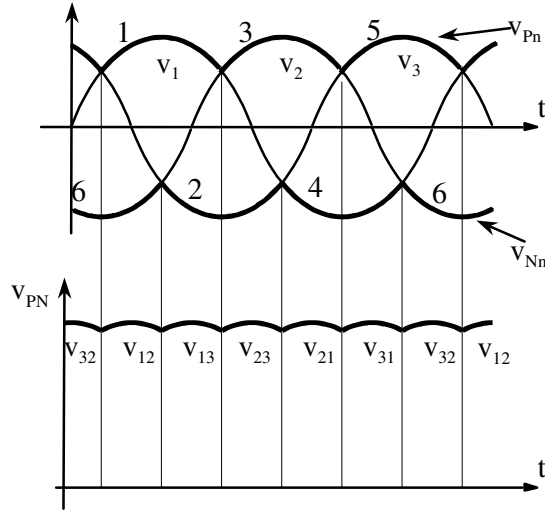
Nelle applicazioni industriali dove è disponibile una alimentazione trifase è preferibile utilizzare un ponte raddrizzatore trifase che presenta oscillazioni di corrente più contenute rispetto all'equivalente monofase.

### 9.4.1 Ponte raddrizzatore con carico resistivo

La struttura del convertitore è riportata in Figura 9-7 e le forme d'onda, ottenute in maniera analoga a quanto visto per il ponte monofase, sono riportate in Figura 9-8 (sono in conduzione il diodo superiore con il maggior potenziale anodico e il diodo inferiore con il minor potenziale catodico).

**Figura 9-7. Raddrizzatore trifase con carico resistivo**

Il potenziale del morsetto “P” rispetto al centro stella dei generatori “n” segue, quindi, l’involuppo superiore delle tre tensioni di fase, mentre quello del morsetto N segue l’involuppo inferiore. La tensione sul carico  $v_d$  coincide con la tensione  $v_{PN}$  tra i morsetti P e N:  $v_d = v_{Pn} - v_{Nn}$ . Il suo valore massimo è pari al valore massimo della tensione concatenata e la sua periodicità è pari a  $1/6$  del periodo della fondamentale.



**Figura 9-8. Forme d'onda di tensione in un raddrizzatore trifase con carico resistivo**

Il valore medio della tensione raddrizzata può essere ottenuto integrando per  $T/6$  la tensione concatenata ( $V_c$  è il valore efficace della tensione concatenata):

$$V_{do} = \frac{1}{T/6} \int_{-\frac{T}{12}}^{\frac{T}{12}} \sqrt{2} \cdot V_c \cos(\omega t) dt = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} \cdot V_c = 1.35 \cdot V_c$$

Il valore della tensione  $v_d$  varia tra un massimo pari a  $\sqrt{2} \cdot V_c \cong 1.414 \cdot V_c$  ed un minimo pari a  $\sqrt{2} \cdot V_c \cos(\pi/6) \cong 1.225 \cdot V_c$  con una fluttuazione (ripple) decisamente più limitata rispetto al caso monofase.

La corrente nel carico resistivo ha un andamento simile a quello della tensione raddrizzata. La corrente di linea, invece, si può facilmente ricostruire osservando che corrisponde alla corrente che circola nel diodo superiore corrispondente e, cambiata di segno, alla corrente del diodo inferiore. Per la linea 1 risulta, quindi,  $i_1 = i_{D1} - i_{D4}$ . In Figura 9-9 viene mostrato l'andamento della corrente della linea 1 e, con tratteggio, la sua prima armonica, il cui valore massimo si ottiene mediante lo sviluppo in serie di Fourier (la funzione è simmetrica rispetto all'origine e quindi è costituita da sole sinusoidi):

$$I_{11max} = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_1(t) \cdot \sin(\omega t) dt$$

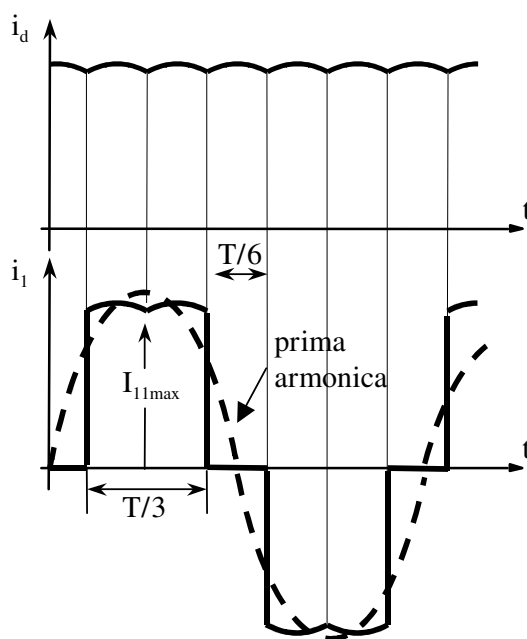


Figura 9-9. Forme d'onda di corrente in un raddrizzatore trifase con carico resistivo

#### 9.4.2 Ponte raddrizzatore trifase con corrente, lato continua, costante

Si consideri il circuito rappresentato in Figura 9-10 in cui il carico può essere rappresentato da un generatore di corrente costante. Come già visto per il caso di carico resistivo, tra i diodi a catodo comune conduce quello che possiede il maggiore potenziale dell'anodo e, viceversa, per i diodi ad anodo comune.

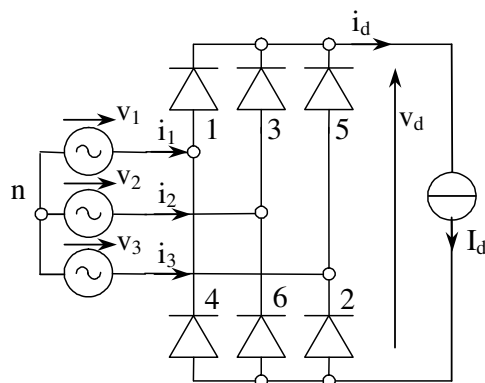
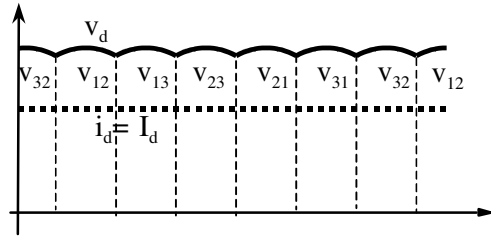


Figura 9-10. Raddrizzatore trifase con generatore di corrente

In questo caso l'andamento della tensione sul carico è ancora la differenza tra l'involuppo superiore e inferiore delle tre tensioni di fase, come lo era per il caso precedente di carico resistivo (si veda Figura 9-11).



**Figura 9-11. Andamenti di tensione e corrente nel carico**

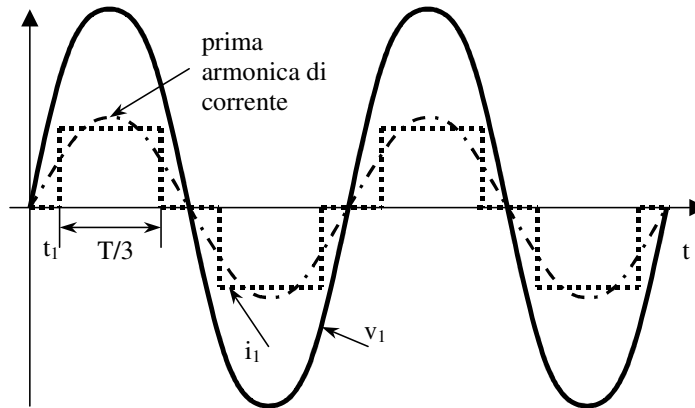
La corrente di linea segue le stesse regole già introdotte nel paragrafo precedente: è pari alla corrente nel diodo il cui anodo è connesso alla linea ed è l'inverso della corrente che circola nel diodo con il catodo connesso. Poiché i diodi conducono per  $1/3$  del periodo  $T$ , l'andamento della corrente di linea è rappresentato in Figura 9-12. Nella stessa figura viene anche visualizzata la prima armonica ad essa associata, che risulta in fase con la tensione.

Il suo valore massimo si può facilmente ottenere mediante lo sviluppo in serie di Fourier (la funzione è simmetrica rispetto all'origine e quindi è costituita da sole sinusoidi):

$$I_{11max} = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_1(t) \cdot \sin(\omega t) dt = 4 \cdot \frac{1}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} I_d \cdot \sin \alpha d\alpha = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \cong 1.1 \cdot I_d$$

Il valore efficace della prima armonica della corrente vale, quindi:

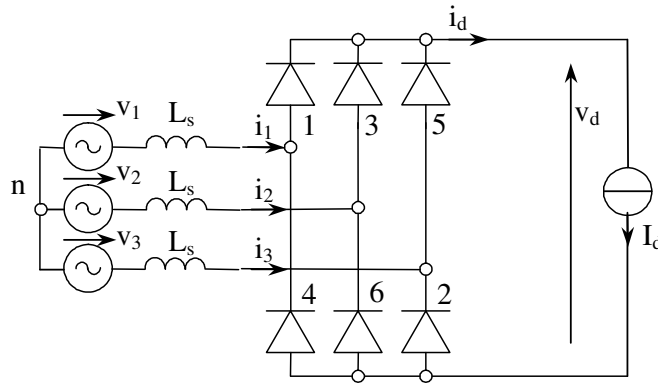
$$I_{11} = \frac{I_{11max}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \cong 0.78 \cdot I_d$$



**Figura 9-12. Andamenti di tensione e corrente di linea**

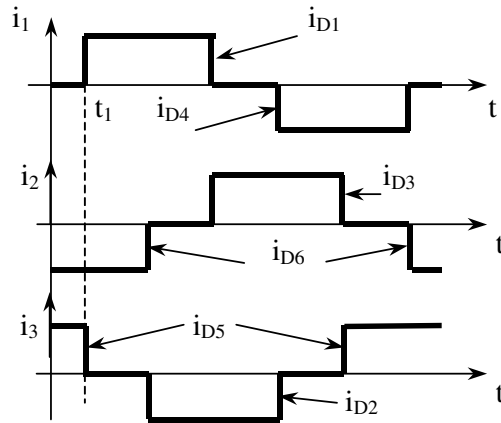
#### 9.4.3 Raddrizzatore trifase con corrente, lato continua, costante e $L_s \neq 0$

Come per il caso monofase, la presenza di una induttanza  $L_s$  non permette alla corrente di linea di assumere l'andamento a gradino di Figura 9-12, in quanto una variazione a gradino implica una derivata infinita e, quindi, una tensione sull'induttanza (proporzionale alla derivata della corrente) infinita.



**Figura 9-13. Raddrizzatore trifase con corrente costante lato continua e  $L_s \neq 0$**

Si consideri la Figura 9-14 ed in particolare l'istante  $t_1$ . Appena prima di tale istante sono in conduzione i diodi D6 e D5. All'istante  $t_1$  il diodo D5 va in stato di blocco mentre D1 inizia a condurre. D6 continua a condurre la corrente  $I_d$ .

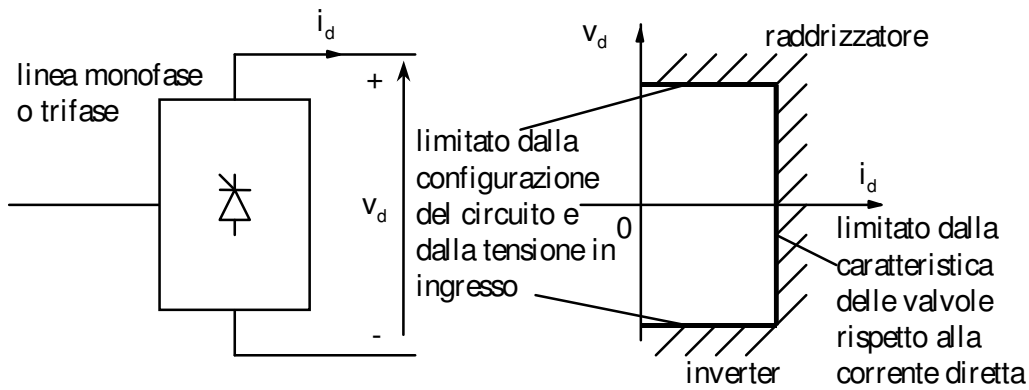


**Figura 9-14. Andamento delle correnti di linea**

Il circuito equivalente su cui studiare la commutazione tra D5 e D1 è presentato i XXXX.

## 9.5 Raddrizzatori controllati

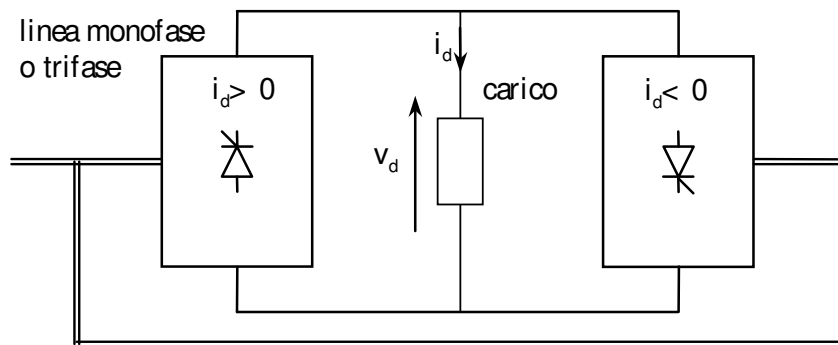
Sono convertitori AC/DC con tensione, lato continua, regolabile in modulo. L'alimentazione AC è sinusoidale e a frequenza fissa (in Italia 50 Hz). Vengono utilizzati, come valvole, i tiristori. Le potenze in gioco possono essere elevate per le possibilità offerte da tali componenti (tensioni di blocco e correnti dirette elevate). Il flusso di potenza può essere bidirezionale (funzionamento da raddrizzatore o da inverter), ma poiché la corrente non può cambiare segno, questi convertitori operano solo su due quadranti.



**Figura 9-15. Funzionamento di un raddrizzatore controllato**

Tensioni  $V_d$  e correnti  $I_d$  positive indicano un funzionamento da raddrizzatore, mentre con  $V_d$  negative e  $I_d$  positive si ha il funzionamento come inverter. In questo caso, per il corretto funzionamento del convertitore, è necessaria la presenza, nel carico, di un generatore (batteria o forza elettromotrice) che mantenga a corrente  $I_d$  positiva.

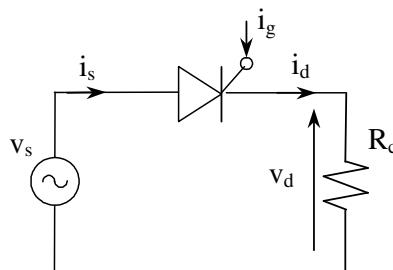
Collegando opportunamente due convertitori a due quadranti è possibile ottenere un convertitore a 4 quadranti. In Figura 9-16 viene mostrato un possibile collegamento di due convertitori.



**Figura 9-16. Funzionamento di un raddrizzatore controllato**

### 9.5.1 Convertitore monofase controllato a semplice semionda

Il circuito monofase controllato a semplice semionda è costituito da una sola valvola (tiristore o SCR) a conduzione unidirezionale, comandabile in chiusura, posta in serie ad un generico carico. Il circuito è alimentato da una tensione alternata sinusoidale. Tale configurazione circuitale ha un limitato interesse pratico per le limitazioni intrinseche che presenta, tuttavia il suo studio mette in luce una serie di peculiarità tipiche per comprendere i circuiti che trovano ampia applicazione.



**Figura 9-17. Raddrizzatore controllato a semplice semionda, su carico resistivo**

Fino a quando non viene fornita la necessaria corrente  $i_g$  al gate, il tiristore permane in stato di blocco (diretto e inverso). Il carico risulta, quindi, scollegato dall'alimentazione. Nel momento in cui viene fatta circolare una corrente  $i_g$  opportuna, il tiristore si comporta come un diodo. Se, in tale istante, la valvola è polarizzata direttamente, la valvola si chiude e permane in stato di chiusura senza necessità di mantenere la corrente  $i_g$ . Verranno ripristinate le capacità di blocco non appena la corrente della valvola ( $i_d$  o  $i_s$ ) si annulla. Per i carichi differenti dal caso puramente resistivo i ragionamenti sono simili a quelli presentati per il raddrizzatore non controllato.

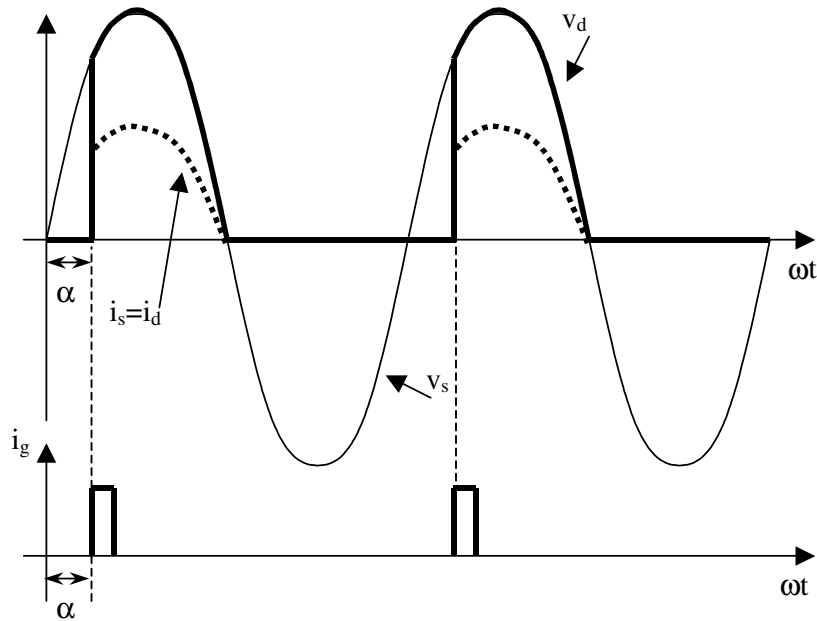


Figura 9-18. Forme d'onda di tensione e corrente in un raddrizzatore controllato a semplice semionda, su carico resistivo

## 9.6 Raddrizzatore monofase a ponte controllato

### 9.6.1 Raddrizzatore con corrente, lato continua, costante

Si consideri il circuito rappresentato in Figura 9-19 in cui il carico può essere rappresentato da un generatore di corrente costante. E' il caso di carichi fortemente induttivi, in cui la variazione della corrente è limitata dalla elevata costante di tempo del carico fino a tal punto da considerarla nulla. Come già visto per il caso di carico resistivo, tra i diodi a catodo comune conduce quello che possiede il maggiore potenziale dell'anodo e, viceversa, per i diodi ad anodo comune.

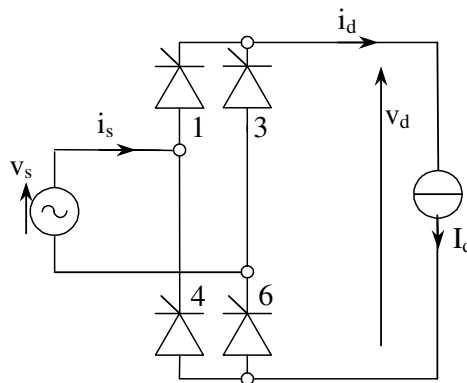


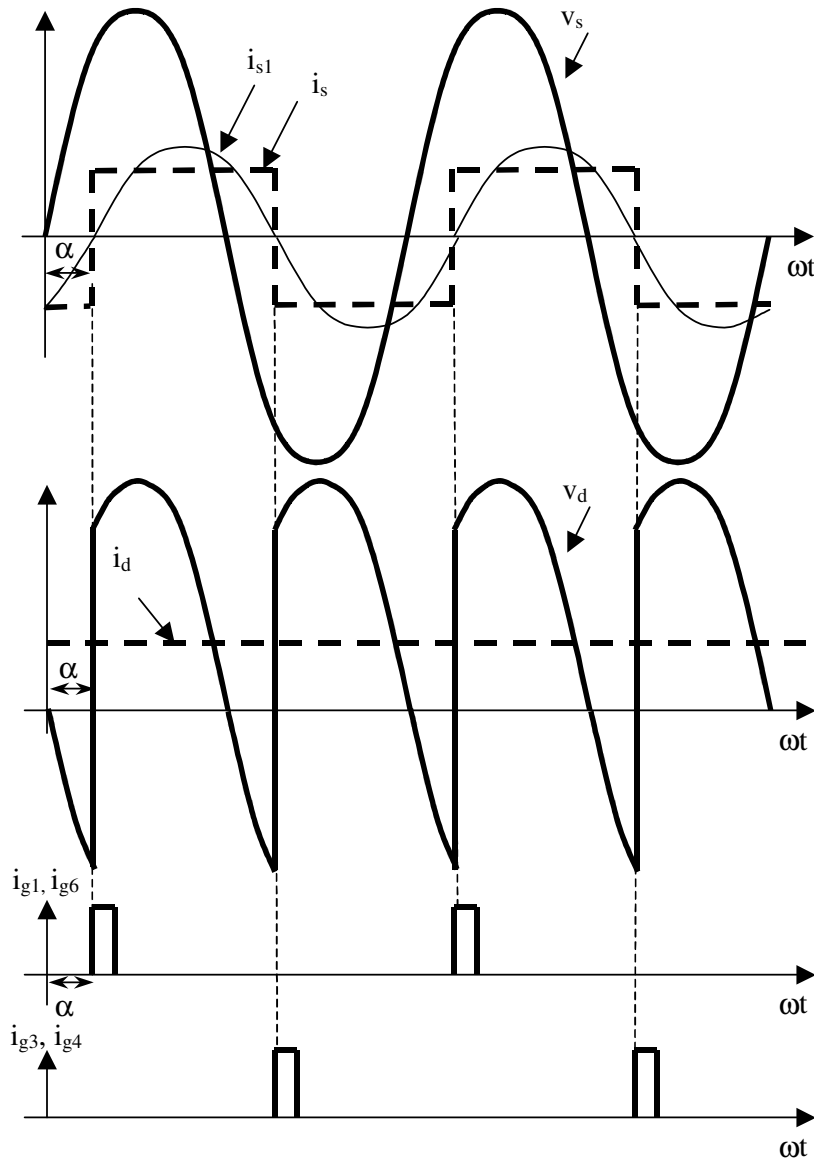
Figura 9-19. Raddrizzatore controllato a ponte, su carico con corrente costante

Mediante la corrente di gate dei tiristori, è possibile decidere l'istante di chiusura ( $t_o=\alpha/\omega$ ) delle valvole stessa. In Figura 9-20 vengono presentati gli andamenti delle correnti e delle tensioni sia di linea che del carico. Viene anche presentato l'andamento della prima armonica della corrente di linea ( $i_{s1}$ ). Si nota che l'istante di accensione, a cui è associato l'angolo  $\alpha$ , determina anche lo sfasamento tra la tensione di linea  $v_s$  e la prima armonica della corrente  $i_s$ .

Il valore medio della tensione sul carico può essere ottenuta integrando l'andamento della tensione  $v_s$  in un semiperiodo:

$$V_d(\alpha) = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} V_s \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_s \cos \alpha = V_{do} \cos \alpha \cong 0.9 V_s \cos \alpha$$

Al variare dell'angolo  $\alpha$  è quindi possibile variare il valore medio della tensione sul carico, come presentato in Figura 9-21. Per  $\alpha < \pi/2$  si ha il funzionamento come raddrizzatore (Figura 9-20) ( $V_d > 0$ ,  $i_d > 0$ ); per  $\pi/2 < \alpha < \pi$  si ha il funzionamento da inverter (Figura 9-22) ( $V_d < 0$ ,  $i_d > 0$ ).



**Figura 9-20. Forme d'onda di tensione e corrente in un raddrizzatore controllato a ponte, su carico con corrente costante**

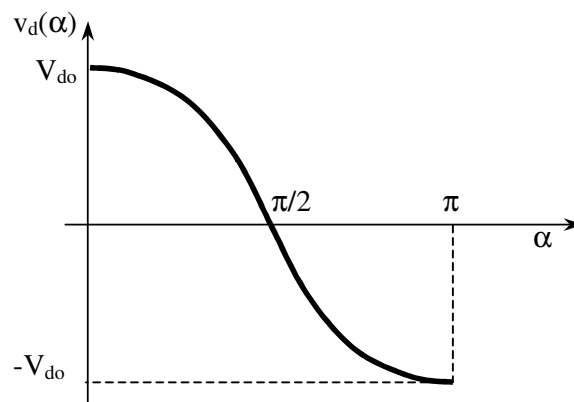
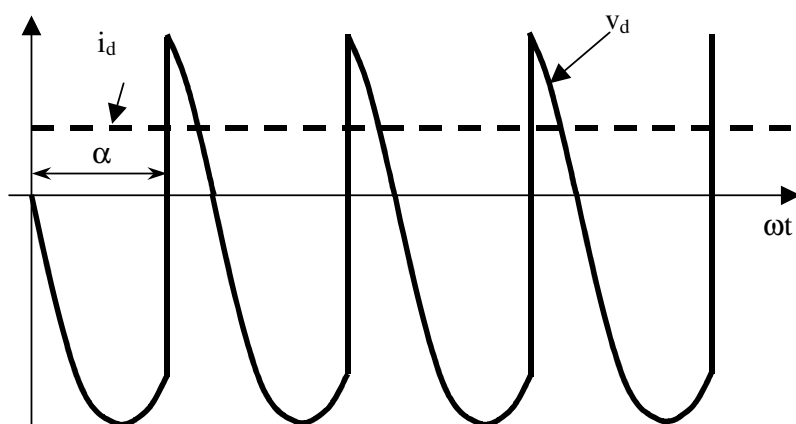
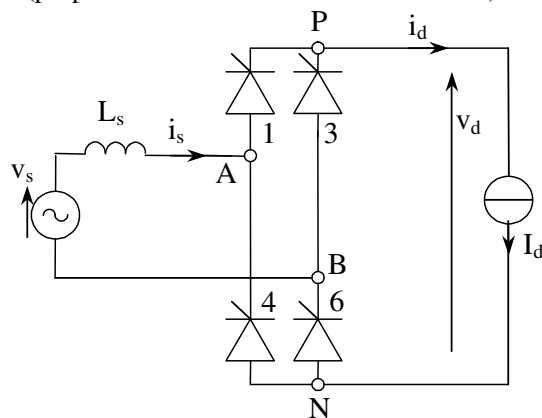

 Figura 9-21. Andamento della tensione sul carico in funzione dell'angolo  $\alpha$ 


Figura 9-22. Forme d'onda di tensione in funzionamento da inverter

### 9.6.2 Raddrizzatore con corrente, lato continua, costante e induttanza di linea $L_s \neq 0$

Come già descritto in precedenza a proposito del ponte non controllato, la presenza di una induttanza di linea  $L_s$  non permette che la corrente  $i_s$  possa assumere l'andamento a gradino di Figura 9-20, in quanto una variazione a gradino implica una derivata infinita e, quindi, una tensione sull'induttanza (proporzionale alla derivata della corrente) infinita.


 Figura 9-23. Raddrizzatore controllato a ponte, con corrente costante lato continua e  $L_s \neq 0$

In questo caso, però, l'istante di inizio della commutazione non corrisponde al passaggio per lo zero della tensione di linea, ma è imposto dall'angolo  $\alpha$  di accensione dei tiristori.. Esisterà, quindi, un angolo di commutazione  $\mu$  in cui conducono simultaneamente la coppia di tiristori 1 e 3 e la coppia 4 e 6. In questo periodo la tensione sul carico è nulla e il valore della corrente  $i_s$  passa da  $-I_d$  a  $I_d$  (o viceversa nell'altro semiponte).

## 9.7 Raddrizzatore trifase a ponte controllato

Il raddrizzatore trifase controllato ha un comportamento identico a quello non controllato, ad eccezione del fatto che le valvole utilizzate non sono diodi ma tiristori. E' possibile, quindi, decidere, mediante una opportuna corrente di gate, l'istante di passaggio dallo stato di blocco diretto a quello di diodo. E' facile intuire il fatto che non ha senso comandare il gate prima che la valvola possa condurre; questo avviene per la valvola che possiede il potenziale di anodo maggiore tra tutte quelle a catodo comune (superiori: 1,3,5), e per la valvola che possiede il potenziale di catodo minore tra tutte quelle ad anodo comune (inferiori: 4,6,2).

### 9.7.1 Raddrizzatore con corrente, lato continua, costante

Si consideri il circuito rappresentato in Figura 9-24 in cui il carico può essere rappresentato da un generatore di corrente costante e pari a  $I_d$ . L'andamento della tensione sul carico è visualizzata in Figura 9-25, dove è possibile notare l'angolo di ritardo  $\alpha$ , tra l'istante di commutazione naturale tipico del ponte a diodi e l'inizio dell'impulso di corrente di gate (in figura viene mostrato tale impulso per il tiristore 1).

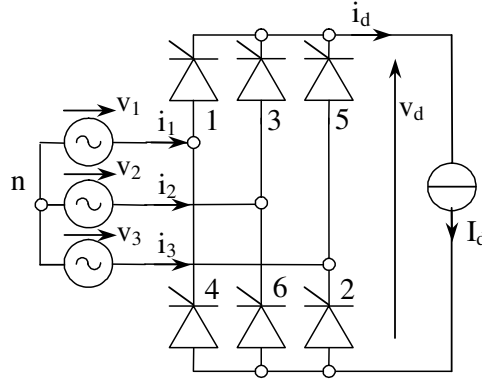


Figura 9-24. Raddrizzatore trifase con generatore di corrente

Il valore medio della tensione raddrizzata può essere ottenuto integrando per  $T/6$  la tensione concatenata ( $V_c$  è il valore efficace della tensione concatenata):

$$V_d(\alpha) = \frac{1}{\pi/3} \int_{-\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha} \sqrt{2} \cdot V_c \cos(\omega t) d\omega t = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} \cdot V_c \cos(\alpha) \cong 1.35 \cdot V_c \cos(\alpha)$$

Variando  $\alpha$  è possibile ottenere in uscita una tensione variabile tra  $1.35V_c$  e  $-1.35V_c$ . Per  $V_d(\alpha) > 0$  ( $i_d$  non può che essere positiva) si ha il funzionamento da raddrizzatore, mentre per  $V_d(\alpha) < 0$  quello da inverter.

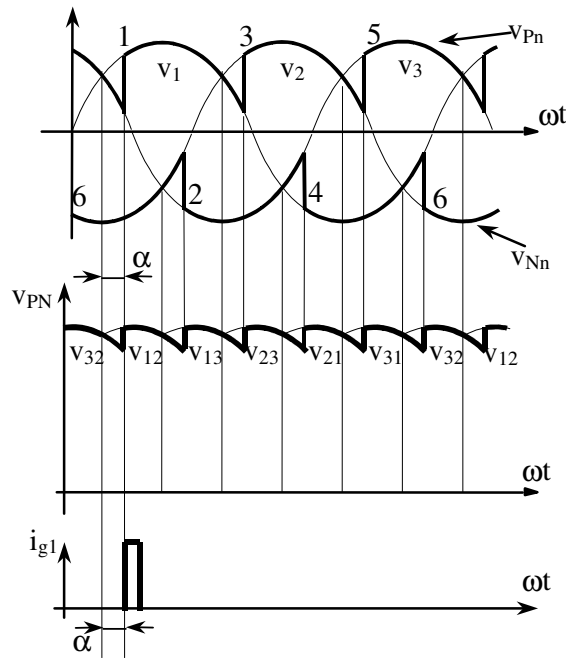


Figura 9-25. Forme d'onda di tensione in un raddrizzatore trifase controllato

La corrente di linea segue le stesse regole già introdotte per il ponte a diodi: è pari alla corrente nel tiristore il cui anodo è connesso alla linea ed è l'inverso della corrente che circola nel tiristore con il catodo connesso. Poiché i tiristori conducono per  $1/3$  del periodo  $T$ , con un ritardo  $\alpha/\omega$  rispetto all'istante della commutazione naturale, l'andamento della corrente di linea è rappresentato in Figura 9-26. Nella stessa figura viene anche visualizzata la prima armonica ad essa associata, che risulta in ritardo dell'angolo  $\alpha$  rispetto alla corrispondente tensione di fase.

Il suo valore massimo è identico a quello calcolato per il ponte a diodi:

$$I_{11max} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \cong 1.1 \cdot I_d$$

Il valore efficace della prima armonica della corrente vale, quindi:

$$I_{11} = \frac{I_{11max}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \cong 0.78 \cdot I_d$$

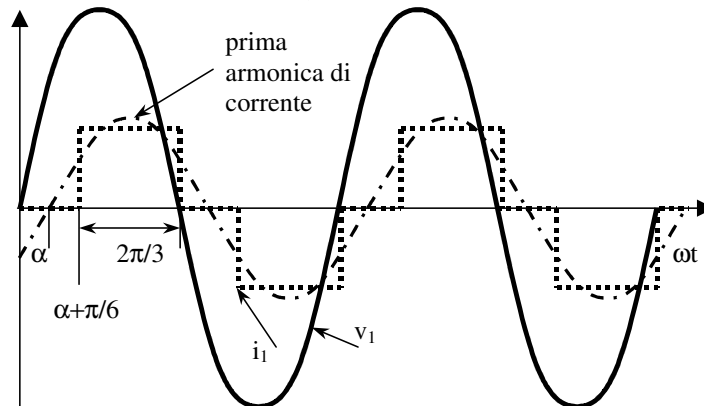
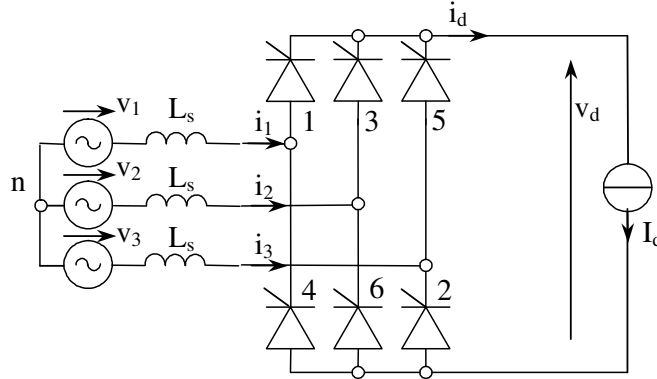


Figura 9-26. Andamenti di tensione e corrente di linea

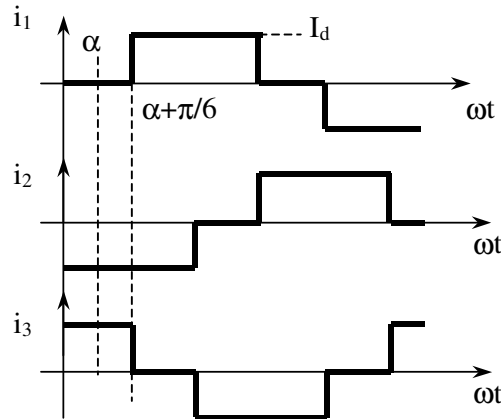
### 9.7.2 Raddrizzatore trifase con corrente, lato continua, costante e $L_s \neq 0$

Le uniche differenze rispetto al caso del ponte trifase non controllato riguardano il fatto che l'istante di accensione non è naturale bensì comandato attraverso una opportuna corrente di gate. Ciò che cambia, quindi, è l'istante di inizio della commutazione e le condizioni iniziali differenti.



**Figura 9-27. Raddrizzatore trifase con corrente costante lato continua e  $L_s \neq 0$**

Si consideri la Figura 9-28 ed in particolare l'istante corrispondente all'angolo  $\alpha + \pi/6$ . Appena prima di tale istante sono in conduzione i tiristori 6 e 5. Appena dopo il tiristore 5 va in stato di blocco mentre l'1 inizia a condurre. Il tiristore 6 continua a condurre la corrente  $I_d$ .



**Figura 9-28. Andamento delle correnti di linea nel caso ideale di  $L_s=0$**

Il circuito equivalente su cui studiare la commutazione tra il tiristore 5 e 1 è presentato in Figura 9-29.

**Figura 9-29. Circuito equivalente durante la commutazione tra il tiristore 5 e 1**

Le equazioni sono identiche al caso non controllato. Quello che cambia è che il transitorio inizia all'istante  $(\alpha + \pi/6)/\omega$ . In tale istante la corrente della fase 1 è nulla.

$$i_1(t) = \frac{V_{cmax}}{2\omega L_s} (\cos(\alpha) - \cos(\omega t))$$

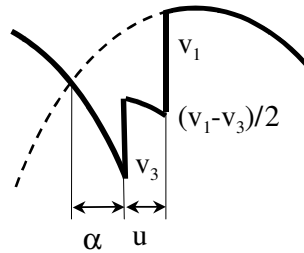
L'angolo di commutazione  $u$  è tale da soddisfare la seguente uguaglianza:

$$i_1(\alpha + u) = I_d = \frac{V_{cmax}}{2\omega L_s} (\cos(\alpha) - \cos(\alpha + u))$$

$$u = \arccos\left(\cos(\alpha) - \frac{2I_d \omega L_s}{V_{cmax}}\right) - \alpha$$

Nel periodo di commutazione la tensione sul carico è differente dall'andamento teorico, e assume ancora il valore intermedio tra le due tensioni di fase, come viene evidenziato nella Figura 9-30.

$$v_d(t) = v_{12}(t) - \frac{v_{13}(t)}{2}$$



**Figura 9-30. Forme d'onda di tensione in un raddrizzatore trifase con induttanza  $L_s \neq 0$**

La prima armonica della corrente di linea è in ritardo rispetto alla corrispondente tensione di fase di un angolo approssimabile a  $\alpha + u/2$ .

La presenza dell'angolo  $u$  di commutazione e la necessità di disporre di un tempo minimo affinché il tiristore che deve andare in stato di blocco possa sopportare il riapplicarsi di una tensione positiva senza riaccendersi, richiedono che il limite massimo dell'angolo  $\alpha$ , durante il funzionamento da inverter, sia minore di  $180^\circ$ . Viene usualmente indicato in  $150^\circ$  tale limite. In caso contrario si avrebbe una commutazione fallita dovuta al fatto che alla valvola in procinto di spegnersi viene riapplicata una tensione diretta prima che siano state ripristinate le sue capacità di blocco.