

A09
43

Armando Bellini
Stefano Bifaretti
Stefano Costantini

Elettronica di potenza



Copyright © MMIV
ARACNE editrice S.r.l.

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

via Raffaele Garofalo, 133 a/b
00173 Roma
(06) 93781065

ISBN 88-7999-916-8

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: dicembre 2004
I ristampa aggiornata: ottobre 2006

Indice

Elenco delle figure	vii
Elenco delle tabelle	xvii
Introduzione	1
I Semiconduttori impiegati nei convertitori statici	5
<hr/>	
1 Diodi	7
1.1 Caratteristiche statiche	8
1.2 Comportamento transitorio	9
1.3 Diodi particolari	13
1.3.1 Diodi Schottky	13
1.3.2 Diodi Zener	14
1.4 Specifiche fornite dal costruttore	14
1.4.1 Portate	14
1.4.2 Dati relativi alle caratteristiche statiche	15
1.4.3 Dati relativi al comportamento transitorio	15
1.5 Comportamento termico	16
1.5.1 Determinazione delle perdite	16
1.5.2 Dispositivi di dissipazione.	19
1.5.3 Determinazione della temperatura di giunzione	20
1.6 Protezioni	24
1.6.1 Protezioni contro sovracorrenti	24
1.6.2 Protezioni contro sovratensioni	25
1.7 Montaggi in serie e in parallelo	30
1.7.1 Montaggio in parallelo	30
1.7.2 Montaggio in serie	31

2	Transistor bipolari (BJT)	33
2.1	Caratteristiche statiche	34
2.2	Comportamento transitorio	35
2.2.1	Commutazione dallo stato di interdizione a quello di saturazione	35
2.2.2	Commutazione dallo stato di saturazione a quello di interdizione	36
2.2.3	Capacità	36
2.3	Area di sicurezza (SOAR)	37
2.4	Transistor particolari: Darlington	41
2.5	Specifiche fornite dal costruttore	43
2.5.1	Dati relativi al comportamento statico	44
2.5.2	Dati relativi al comportamento transitorio	44
2.6	Circuito di pilotaggio	44
2.7	Protezioni	49
2.8	Montaggio in parallelo	50
3	Transistor ad effetto di campo (MOSFET)	53
3.1	Struttura dei Transistor MOSFET	53
3.2	Principali differenze tra MOSFET e BJT	56
4	Transistor bipolari con gate isolato (IGBT)	59
4.1	Struttura degli IGBT	59
4.2	Caratteristiche degli IGBT	61
5	Raddrizzatori controllati al silicio	65
5.1	Caratteristiche statiche	66
5.1.1	Caratteristica anodica	66
5.1.2	Meccanismi di innesco	67
5.1.3	Caratteristica dell'elettrodo di controllo	70
5.2	Comportamento transitorio	74
5.2.1	Commutazione dallo stato di interdizione a quello di conduzione	74
5.2.2	Commutazione dallo stato di conduzione a quello di interdizione	74
5.3	Componenti particolari	78
5.3.1	Triac	78
5.3.2	Raddrizzatori Controllati Asimmetrici	79

5.4	Specifiche fornite dal costruttore	80
5.4.1	Dati relativi al comportamento statico	80
5.4.2	Dati relativi al comportamento transitorio	81
5.5	Circuito di pilotaggio	82
5.6	Protezioni	87
5.6.1	Protezioni contro eccessivi valori del di/dt	87
5.6.2	Protezioni contro eccessivi valori del dv/dt	87
5.6.3	Protezioni contro sovracorrenti	90
5.6.4	Protezioni contro sovratensioni	90
5.7	Montaggi in serie e in parallelo	90
6	Componenti derivati dai Tiristori	91
6.1	Gate Turn-Off thyristors: GTO	91
6.2	Gate Controlled turn-off Thyristor: GCT	96
6.3	Tiristori con Gate isolato	99
II	Convertitori statici	105
7	Caratterizzazione dei convertitori statici	107
7.1	Trasferimento di energia	108
7.2	Funzionamento come amplificatore	111
8	Convertitori c.c.-c.c	113
8.1	Convertitore con tensione di uscita inferiore a quella di alimentazione	114
8.1.1	Carico puramente resistivo	114
8.1.2	Carico induttivo	117
8.1.3	Carico attivo	130
8.1.4	Modalità di controllo del convertitore	135
8.2	Convertitore con tensione di uscita maggiore di quella di alimentazione	141
8.3	Convertitori c.c.-c.c. bidirezionali	146
8.3.1	Convertitori bidirezionali a due quadranti	146
8.3.2	Convertitori bidirezionali a quattro quadranti	147
8.4	Realizzazione con GTO	149
8.5	Realizzazione con Tiristori	150

9	Convertitori c.c.-c.a.	165
9.1	Inverter realizzati con interruttori statici	165
9.1.1	Struttura a ponte	166
9.1.2	Struttura a semiponte	167
9.1.3	Struttura a push-pull	168
9.1.4	Circuiti atti alla riduzione delle perdite di commutazione negli inverter a Transistor	168
9.1.5	Circuiti atti alla riduzione delle perdite di commutazione negli inverter a GTO	177
9.1.6	Inverter a Tiristori	177
9.2	Inverter a tiristori senza interruttori statici	189
9.2.1	Inverter parallelo.	189
9.2.2	Inverter serie	195
9.2.3	Inverter a spegnimento complementare	201
9.3	Inverter trifase	205
9.3.1	Inverter trifase con interruttori statici	206
9.3.2	Inverter trifase a Tiristori	207
9.4	Riduzione del contenuto armonico della tensione di uscita	223
9.5	Variazione dell'ampiezza della tensione di uscita	228
9.6	Tecniche di modulazione impiegate per variare la tensione di uscita	230
9.6.1	Tecniche di modulazione utilizzate con dispositivi prevalentemente analogici	232
9.6.2	Tecniche di modulazione realizzate impiegando dispositivi a microprocessore	243
9.6.3	Peculiarità delle tecniche di modulazione impiegate nei sistemi trifase	245
10	Convertitori c.a.-c.c.	247
10.1	Convertitori c.a.-c.c. alimentati da rete monofase	248
10.1.1	Convertitore monofase a semionda	248
10.1.2	Convertitore ad onda intera con trasformatore a presa centrale	258
10.1.3	Convertitore a ponte totalmente controllato	263
10.1.4	Convertitore a ponte semicontrollato	265
10.2	Convertitori c.a.-c.c. alimentati da rete trifase	267
10.2.1	Convertitore trifase a semionda	267

10.2.2	Convertitore trifase ad onda intera con trasformatore a presa centrale	272
10.2.3	Convertitore trifase a ponte totalmente controllato	276
10.2.4	Convertitore trifase a ponte semicontrollato	280
10.3	Convertitori polifase	283
10.4	Convertitori c.a.-c.c. con carico attivo	284
10.4.1	Convertitore monofase a semionda	284
10.4.2	Convertitore monofase ad onda intera	288
10.5	Convertitori c.a.-c.c. bidirezionali	288
10.5.1	Convertitori c.a.-c.c. a quattro quadranti	290
10.6	Effetti prodotti dal convertitore sulla rete di alimentazione	295
10.6.1	Convertitore monofase a ponte totalmente controllato	296
10.6.2	Convertitore monofase con trasformatore a presa centrale	299
10.6.3	Convertitore monofase a ponte semicontrollato	300
10.6.4	Convertitore trifase a ponte totalmente controllato	302
10.6.5	Convertitore trifase ad onda intera con trasformatore a presa centrale	304
10.6.6	Convertitore trifase a ponte semicontrollato	304
10.7	Miglioramento del fattore di potenza	306
10.7.1	Convertitore monodirezionale a struttura multipla	308
10.7.2	Convertitore bidirezionale a struttura multipla	312
10.7.3	Convertitori monodirezionali con interruttori statici	317
10.7.4	Convertitore bidirezionale con interruttori statici	321
10.8	Influenza dell'impedenza della sorgente di alimentazione	325
10.8.1	Convertitore monofase a ponte totalmente controllato	325
10.8.2	Convertitore monofase a ponte semicontrollato	328
10.8.3	Convertitore trifase a ponte totalmente controllato	329
10.8.4	Convertitore trifase a ponte semicontrollato	332
11	Convertitori c.a.-c.a.	333
11.1	Convertitori a controllo di fase	333
11.1.1	Convertitore monofase	333
11.1.2	Convertitore trifase	336
11.2	Cicloconvertitori	340
11.2.1	Modalità di comando dei cicloconvertitori	341
11.2.2	Cicloconvertitori con uscita trifase	343

11.3	Convertitori a matrice	345
12	Convertitori con struttura a più livelli	349
12.1	Inverter con struttura a più livelli	349
13	Convertitori pluristadio	353
13.1	Convertitore bistadio c.a.-c.a.	353
13.2	Convertitori bistadio c.c.-c.c.	355
13.3	Convertitori c.a.-c.c. a tre stadi	359
14	Convertitori risonanti	361
14.1	Convertitori quasi risonanti	362
14.1.1	Interruttori risonanti con corrente di apertura nulla	362
14.1.2	Interruttori risonanti con tensione di apertura nulla	370
14.2	Convertitori a carico risonante	374
14.2.1	Convertitore risonante con carico in serie	375
14.2.2	Convertitore risonante con carico in parallelo al condensatore risonante	376
14.2.3	Convertitore risonante ibrido	378

Introduzione

In seguito alla Riforma Universitaria e all'introduzione dei *Crediti Formativi*, il corso di *Elettronica di Potenza*, già impartito da diversi anni presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma "Tor Vergata", è stato suddiviso in due moduli da 5 crediti ciascuno: *Componenti per l'Elettronica di Potenza* e *Elettronica di Potenza 1*. Il presente volume contiene l'insieme degli argomenti svolti nei due corsi. La struttura del testo tiene conto della peculiarità dei due insegnamenti; infatti mentre *Componenti per l'Elettronica di Potenza* è seguito da Studenti provvisti di una consolidata conoscenza di base in Elettronica Analogica e Digitale (quasi tutti iscritti al corso di Laurea specialistica in Ingegneria Elettronica) il corso di *Elettronica di Potenza 1* è seguito anche da Studenti di corsi di Studi non orientati all'Elettronica. Risulta pertanto necessario effettuare una trattazione dei convertitori statici che ipotizzi l'impiego di interruttori ideali ed un approfondimento che, una volta illustrato il comportamento statico e dinamico dei componenti utilizzati, evidenzii gli effetti che l'impiego di componenti non ideali presenta sul funzionamento dei diversi tipi di convertitore. Conseguentemente il libro è suddiviso in due parti: la prima parte, *Semiconduttori impiegati nei convertitori statici*, è dedicata esclusivamente al corso di *Componenti per l'Elettronica di Potenza*, mentre nella seconda parte la distinzione tra la trattazione generale con componenti ideali e gli approfondimenti sarà evidenziata impiegando caratteri tipografici diversi.

I convertitori statici di energia sono dispositivi elettronici che permettono il trasferimento controllato di energia elettrica da una sorgente ad un carico. I loro campi di impiego sono i più svariati; basta citare i dispositivi di alimentazione in corrente continua o in corrente alternata, gli amplificatori di potenza impiegati nei sistemi di controllo e, in particolare, negli azionamenti elettrici, i gruppi statici di continuità, i convertitori utilizzati per la trasmissione dell'energia elettrica in corrente continua.

Come si vedrà in seguito, gli schemi circuitali impiegati per la realizzazione dei convertitori statici sono molteplici; infatti la struttura del convertitore risulta fortemente influenzata, oltre che dal tipo di sorgente primaria di alimentazione disponibile e dalle peculiarità del carico, dalla potenza che deve essere trasferita al carico e, di

conseguenza, dai tipi di semiconduttori utilizzati.

I primi dispositivi atti alla conversione di energia comparvero verso la fine del diciannovesimo secolo; tali dispositivi erano costituiti da commutatori meccanici e consentivano il trasferimento non controllato di energia da corrente alternata a corrente continua. I primi convertitori in grado di controllare il flusso di energia sono stati, invece, realizzati impiegando macchine elettriche rotanti; tali convertitori (*convertitori rotanti*), il più noto dei quali è il gruppo Ward-Leonard, dal nome dell'Ingegnere tedesco che lo realizzò nel 1891, hanno trovato ampia diffusione in tutto il periodo che va dalla fine del diciannovesimo secolo fino ad oltre la metà del ventesimo secolo. Successivamente, con l'avvento prima dei thyatron e dei mutatori a vapori di mercurio e quindi dei semiconduttori di potenza, i convertitori rotanti sono stati man mano sostituiti con convertitori statici che presentano, rispetto a quelli rotanti, indubbi vantaggi di costo, di affidabilità, di rendimento e di manutenzione.

Lo sviluppo dei semiconduttori di potenza è stato particolarmente rapido. Nell'ultimo ventennio, infatti, si è assistito sia ad un consistente incremento delle potenze manipolabili e delle prestazioni dinamiche delle famiglie di semiconduttori già utilizzate negli anni precedenti sia all'affermazione di nuovi tipi di semiconduttori.

Come si vedrà nella seconda parte del testo, nei convertitori statici di potenza i semiconduttori vengono sempre impiegati, al fine di ridurre l'energia dissipata nel convertitore, in regime di commutazione; vengono cioè fatti funzionare alternativamente in regime di saturazione e in quello di interdizione. Pertanto una prima suddivisione dei semiconduttori impiegati nei convertitori statici può essere effettuata prendendo in considerazione la possibilità di comandarne, mediante un opportuno circuito di pilotaggio, il passaggio dallo stato di interdizione a quello di conduzione ed il passaggio dallo stato di conduzione a quello di interdizione.

Sulla base di tale caratteristica, i semiconduttori di potenza possono, quindi, venire suddivisi in tre distinte famiglie:

- componenti non controllati;
- componenti di cui è possibile comandare solo il passaggio dallo stato di interdizione a quello di conduzione (chiusura o accensione del componente);
- componenti di cui è possibile comandare, oltre alla chiusura, anche il passaggio dallo stato di conduzione a quello di interdizione (apertura o spegnimento).

La prima famiglia è costituita dai Diodi, la seconda dai Raddrizzatori Controllati al Silicio (o Tiristori) e dai Triac, la terza dai Transistor di potenza (bipolari, ad effetto di campo e IGBT) e dai GTO.

I Diodi trovano impiego praticamente in tutti i convertitori. I convertitori alimentati in corrente alternata impiegano, per il controllo del flusso di energia, prevalentemente semiconduttori di cui è possibile comandare solo la chiusura mentre quelli con alimentazione in corrente continua utilizzano, tranne che in convertitori dimensionati per potenze di svariati MW, semiconduttori di cui è possibile comandare sia la chiusura che l'apertura (attualmente quasi esclusivamente Transistor con gate isolato di tipo MOSFET o IGBT).

La prima parte del testo è dedicata alla descrizione delle caratteristiche dei diversi semiconduttori di potenza utilizzati nei convertitori statici, con particolare riferimento al loro comportamento in regime di commutazione. Tale descrizione ha essenzialmente lo scopo di evidenziare le problematiche connesse alla progettazione dei convertitori; pertanto si eviterà, quando non strettamente necessario, di addentrarsi nell'esame del comportamento interno del componente ma ci si limiterà a prendere in considerazione le sole caratteristiche esterne.

Nel capitolo relativo ai Diodi saranno trattati alcuni argomenti, ed in particolare *comportamento termico e protezioni*, comuni a tutti i componenti; pertanto negli altri capitoli la parte generale relativa a tali argomenti non sarà ripetuta.

La seconda parte del testo, invece, prende in considerazione i vari tipi di convertitore cercando, per ognuno di essi, di evidenziare sia le peculiarità relative al trasferimento di energia sia il legame tra la variabile di controllo e la tensione o la corrente di uscita.