

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

Esempio di analisi ai fini della certificazione per la sicurezza elettrica di un convertitore buck a bassa tensione

Relatore

Prof. Caldognetto Tommaso

Laureando

Bissacco Erik

Correlatore

Prof. Stellini Marco

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

Data di laurea 14/03/2024

Sommario

Questa tesi esamina il processo di testing per la certificazione e la commercializzazione di schede circuito elettroniche, con un focus sulla simulazione dei test per una scheda di laboratorio che presenta un circuito convertitore buck a bassa tensione. Si discute l'importanza della conformità normativa e degli standard internazionali, stabiliti dall'International Electrotechnical Commission (IEC), dal Comitato Europeo per la Standardizzazione Elettrotecnica (CENELEC) e dal Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI). La tesi approfondisce le procedure di testing e certificazione necessarie per ottenere l'approvazione alla commercializzazione delle schede circuito elettroniche, inclusi i passaggi del testing, i metodi di valutazione delle prestazioni per dimostrare la conformità alle normative applicabili. Viene presentata una simulazione di test di un circuito convertitore buck a bassa tensione su una scheda di laboratorio, descrivendo i parametri di test, le procedure di simulazione e i risultati ottenuti, con particolare attenzione alla conformità alla sicurezza. Le conclusioni riassumono i principali risultati e discutono le sfide, le opportunità e i potenziali sviluppi futuri nel testing, nella certificazione e nella standardizzazione normativa delle schede circuito elettroniche.

Indice

1	Ente Normatore e Norma	1
1.1	Enti normatori	2
1.2	La Norma	2
2	Rischi e Sicurezza	5
2.1	Fault conditions (Guasti)	5
2.2	Electric shock	6
2.2.1	DVC Decisive Voltage Class	6
2.2.2	Contatti diretti	7
2.2.3	Contatti indiretti	9
2.2.4	isolamenti	10
2.3	Thermal hazards	13
2.3.1	Riduzione rischi di innesco	14
2.3.2	Materiali isolanti	14
2.4	Energy hazards	15
3	Prove di Guasto	17
3.1	Informazioni generali	17
3.2	Specifiche delle prove	18
3.2.1	Prove "meccaniche"	18
3.2.2	Prove elettriche	20
3.2.3	Condizioni anomale	23
3.2.4	Prove dei materiali	25
3.2.5	glow wire	25
3.2.6	Prove climatiche	26
3.2.7	Prove di sovraccarico in output	28
4	La scheda in esame	29
4.1	Classificazione della scheda	31

4.1.1	valutazione dei rischi e delle sicurezze da adottare	31
4.2	Prove di guasto	32
4.2.1	dimostrazione delle prove	34
4.3	strumenti utilizzati per le prove	36
4.4	considerazioni finali	37

Elenco delle figure

2.1	Tabella classi DVC	6
2.2	Requisiti di protezione per il circuito considerato	7
2.3	Tabella 6 gradi di inquinamento	11
2.4	tensioni isolamento per circuiti bassa tensione	13
2.5	tensioni isolamento per circuiti alta tensione	13
2.6	Tabella 15 : temperature di esercizio massime	14
2.7	Tabella 14 : Indicazioni sui vari materiali per isolamento	15
3.1	Tabella 9	19
3.2	Tabella 10	20
3.3	Tabella 18 : Impulse voltage test	21
3.4	Tabella 21	22
3.5	Tabella 25	27
3.6	Tabella 26	28
4.1	Schema elettrico buck	29
4.2	Scheda buck	30
4.3	schede di controllo	31
4.4	Tabella 17	33
4.5	Datasheet buck	34
4.6	Esempio di camera climatica	37
4.7	Acquisitore di segnali	37

Capitolo 1

Ente Normatore e Norma

La regolamentazione dei prodotti è un insieme di leggi, normative e standard che stabiliscono requisiti obbligatori o volontari che i prodotti devono soddisfare per essere commercializzati in determinati mercati o regioni. Questi regolamenti sono progettati per garantire la sicurezza, la qualità e la conformità dei prodotti, proteggendo così i consumatori, l'ambiente e promuovendo il commercio equo e trasparente.

Le regolamentazioni per i prodotti possono coprire una vasta gamma di settori e possono essere emesse a livello nazionale, regionale o internazionale. Le organizzazioni governative, come gli enti di regolamentazione o le agenzie per la protezione dei consumatori, sono responsabili della promulgazione e dell'applicazione di queste regole.

Le regolamentazioni possono riguardare diversi aspetti dei prodotti, tra cui:

1. **Sicurezza:** Requisiti per garantire che i prodotti non rappresentino rischi significativi per la salute o la sicurezza dei consumatori o degli operatori durante l'uso previsto o prevedibile.
2. **Conformità tecnica:** Requisiti per garantire che i prodotti soddisfino determinati standard tecnici o di qualità, che possono essere stabiliti da enti di standardizzazione nazionali o internazionali.
3. **Etichettatura e informazioni al consumatore:** Requisiti per fornire informazioni accurate e comprensibili sui prodotti, inclusi avvertimenti, istruzioni per l'uso e informazioni sulle prestazioni.
4. **Compatibilità ambientale:** Requisiti per minimizzare l'impatto ambientale dei prodotti durante il ciclo di vita, compresa la riduzione dei rifiuti, l'efficienza energetica e il riciclo dei materiali.

5. Conformità normativa: Requisiti per garantire che i prodotti rispettino tutte le leggi e i regolamenti applicabili, inclusi quelli relativi alla proprietà intellettuale, alle dogane e alle tariffe.

La conformità alle regolamentazioni è spesso verificata attraverso test di conformità condotti da laboratori accreditati o da organismi di certificazione indipendenti. La mancata conformità può comportare sanzioni legali o l'impossibilità di commercializzare il prodotto in determinati mercati.

1.1 Enti normatori

La regolamentazione dei prodotti è fondamentale per garantire la sicurezza, la qualità e la conformità dei prodotti commercializzati in vari mercati. A livello internazionale, l'ente normatore di riferimento è l'International Electrotechnical Commission (IEC), che sviluppa e pubblica norme tecniche per una vasta gamma di settori, compresi quelli elettrici ed elettronici.

Il CENELEC (Comitato europeo di normazione elettrotecnica) è l'organizzazione europea incaricata di adottare le norme IEC per l'Europa. Ciò significa che le norme sviluppate dall'IEC vengono riprese dal CENELEC e adattate per rispondere alle esigenze specifiche dell'Unione Europea. Queste norme europee, una volta adottate, diventano obbligatorie per i prodotti commercializzati nell'area europea.

In Italia, il CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano) è l'ente nazionale responsabile della diffusione e dell'applicazione delle norme elettriche ed elettroniche. Il CEI adotta le norme europee e internazionali rilevanti, comprese quelle sviluppate dall'IEC e dal CENELEC, e le rende disponibili per l'adozione da parte delle aziende italiane. Inoltre, il CEI può sviluppare norme nazionali specifiche o apportare modifiche alle norme internazionali ed europee per rispondere alle esigenze e alle specificità del mercato italiano.

In questo modo, il processo di sviluppo e adozione delle norme elettriche ed elettroniche segue un percorso che parte dall'IEC a livello internazionale, passa attraverso il CENELEC per l'Europa e giunge al CEI per l'Italia. Questo assicura un allineamento tra le normative internazionali, europee e nazionali, garantendo nel contempo che i prodotti commercializzati rispettino i requisiti tecnici e legali applicabili nei diversi mercati.

1.2 La Norma

La Norma studiata è la IEC 61800-5-1: Safety requirements - Electrical, thermal and energy. Questa norma fornisce i requisiti alla quale un prodotto deve sottostare per poterlo ritenere

sicuro a livello elettrico, termico ed energetico.

La norma si compone di 6 capitoli:

1. Capitolo 1 : Scope

Questa sezione delinea l'ambito dello standard e i suoi obiettivi, fornendo una chiara comprensione delle aree che copre.

2. Capitolo 2 : Normative References

Nella sezione dei Riferimenti Normativi vengono citate altre norme e documenti considerati essenziali per l'applicazione dei requisiti

3. Capitolo 3 : Terms and definitions

Questa parte definisce la terminologia utilizzata in tutto lo standard, garantendo coerenza e chiarezza nella comunicazione.

4. Capitolo 4 : Protection against electric shock, thermal and energy hazards

Vengono definiti i requisiti per la progettazione e costruzione di una scheda ed è la parte dove effettivamente si delineano le varie regole da seguire per il prodotto

5. Capitolo 5 : Test Requirements

Questa sezione include disposizioni per i test e la verifica della conformità ai requisiti dello standard, garantendo che i dispositivi soddisfino i criteri di prestazione specificati.

6. Capitolo 6 : Information and marking requirements

Vengono definite le informazioni necessarie allo svolgimento in sicurezza delle operazioni di installazione, uso e manutenzione.

Nell'elaborato verranno trattati i capitoli 4 e 5 in quanto il loro contenuto è utile ai fini della tesi.

Capitolo 2

Rischi e Sicurezza

”Protection against electric shock, thermal, and energy hazards.”

Nel secondo capitolo si affronta la parte teorica e vengono spiegate le varie prove, si dà un accenno alle prove di guasto ed è divisa in 4 macroargomenti : Fault conditions , electric shock , thermal hazards, energy hazards

2.1 Fault conditions (Guasti)

La verifica dei guasti rappresenta una fase cruciale, tuttavia, a causa della genericità della normativa comprendente grande varietà di prodotti, risulta complesso fornire indicazioni specifiche. Di conseguenza, è necessario fornire un’esplicazione sulle linee guida della norma riguardo a ciò che deve essere analizzato.

Ad esempio, le prove di cortocircuito e/o circuito aperto risultano pertinenti per le parti che gestiscono potenza o che sono adiacenti ad esse. Al contrario, non sempre è necessario eseguirle sui circuiti ausiliari dedicati esclusivamente allo scambio di dati. È fondamentale condurre un’analisi dei circuiti presenti sulla scheda e identificare quelli meno rilevanti, escludendoli dal processo di testing.

È fondamentale progettare il dispositivo in modo tale da evitare modalità o sequenze di funzionamento che possano causare guasti o il malfunzionamento di un componente, portando così a situazioni di pericolo, a meno che non siano previste altre misure preventive nell’ambito dell’installazione. La protezione contro i pericoli termici e gli shock elettrici deve essere garantita sia in condizioni di guasto singolo che in condizioni normali di funzionamento. È necessario condurre un’analisi del circuito al fine di individuare i componenti critici, inclusi i sistemi di isolamento, il cui guasto potrebbe comportare rischi di shock termico o elettrico. Tale analisi deve considerare gli effetti delle condizioni di cortocircuito e circuito aperto sui singoli componenti.

Non è richiesta l'inclusione dei dispositivi a semiconduttore di potenza nell'analisi se sono stati eseguiti test equivalenti durante i test di cortocircuito, o se è stata dimostrata una probabilità insignificante di guasto dei componenti durante la vita utile prevista del dispositivo.

2.2 Electric shock

Il paragrafo "electric shock" si riferisce alle disposizioni e ai requisiti specifici per garantire la sicurezza delle persone che operano o lavorano vicino a convertitori di potenza. Questo paragrafo stabilisce le misure di protezione e le caratteristiche dei convertitori per ridurre al minimo il rischio di scosse elettriche, che potrebbero derivare da difetti di isolamento, malfunzionamenti o altri fattori.

2.2.1 DVC Decisive Voltage Class

Con DVC ci si riferisce alla tensione critica o significativa a cui avviene un cambiamento di stato nel funzionamento di un circuito.

Nel processo di progettazione di circuiti integrati, è cruciale identificare e comprendere la DVC di un componente, poiché ciò influenzerà la sua affidabilità, la sua durata e le sue prestazioni. Ad esempio, conoscere la DVC di un transistor in un circuito può aiutare a garantire che il dispositivo funzioni correttamente e in modo stabile all'interno dei limiti di tensione specificati.

DVC	Limits of working voltage (V)			Subclause
	a.c. voltage (r.m.s.)	a.c. voltage (peak)	d.c. voltage (mean)	
	U_{ACL}	U_{ACPL}	U_{DCL}	
A ^a	25	35,4	60	4.3.4.2, 4.3.4.4
B	50	71	120	4.3.5.3.1 a), b)
C	1 000	4 500 ^b	1 500	
D	> 1 000	> 4 500	> 1 500	

^a For equipment having only one DVC A circuit, the r.m.s. and peak voltage limits are 30 V and 42,4 V respectively.

^b The value of 4 500 V allows all low-voltage PDS to be covered by Table 7 (possible reflections up to $3 \times \sqrt{2} \times 1\,000\text{ V} = 4\,242\text{ V}$).

Figura 2.1: Tabella classi DVC

La Tabella della Figura 2.1 illustra le tensioni che i circuiti del prodotto devono rispettare per essere classificati nella rispettiva classe.

Una volta determinata la classe di appartenenza, la Tabella della Figura 2.2 viene utilizzata per esaminare i vari requisiti di protezione che devono essere rispettati.

DVC of considered circuit	Protection required against direct contact	Insulation to earthed parts	Insulation to accessible conductive parts that are not earthed	Insulation to adjacent circuit of DVC:			
				A	B	C	D
A	No	a *	a	f *	b	p ‡	p
B	Yes	b	p		b	p ‡	p
C	Yes	b	p			b	p
D	Yes	b	p				b

a Insulation is not necessary for safety, but may be required for functional reasons.
* If the considered circuit is designated as a *SELV circuit*, *basic insulation* is required from earth and from *PELV circuits*.
f *Functional insulation* for circuit of higher voltage.
b *Basic insulation* for circuit of higher voltage.
p *Protective separation* for circuit of higher voltage.
‡ It is permitted to use *basic insulation* for the circuit of higher voltage if protection against direct contact is applied to the considered circuit by *basic or supplementary insulation* for the circuit of higher voltage.

Figura 2.2: Requisiti di protezione per il circuito considerato

Nel caso di dispositivi in cui siano presenti circuiti appartenenti a categorie DVC differenti le compatibilità degli isolamenti tra le varie categorie di DVC sono importanti nel contesto della progettazione elettronica, in particolare quando si considera l'isolamento tra parti elettricamente separate o componenti di un circuito che operano a diverse tensioni di alimentazione. Nella progettazione dei circuiti, è essenziale garantire che gli isolamenti siano adeguati per prevenire cortocircuiti o guasti causati da differenze di tensione. La compatibilità degli isolamenti significa che gli isolamenti utilizzati tra le varie parti del circuito devono essere in grado di sopportare e isolare correttamente le tensioni presenti in ciascuna categoria di DVC. Ciò implica una valutazione accurata delle specifiche di isolamento, come la tensione di isolamento nominale e la resistenza all'isolamento, per garantire che siano adeguate alle tensioni massime previste in ogni categoria di DVC.

2.2.2 Contatti diretti

Il contatto diretto si riferisce a una situazione in cui una persona o un oggetto entra in contatto fisico con un conduttore elettrico attivo o con un'apparecchiatura sotto tensione.

Nel linguaggio della sicurezza elettrica, il contatto diretto è considerato una condizione pericolosa e può causare scosse elettriche, ustioni o addirittura elettrocuzione.

Prevenire il contatto diretto è una preoccupazione primaria nelle pratiche di sicurezza elettrica, e vengono adottate misure come l'isolamento, la protezione e le pratiche di lavoro sicure per ridurre al minimo il rischio di contatto accidentale con componenti elettrici attivi.

2.2.2.1 Protezione dai contatti diretti

2.2.2.1.1 isolamento delle parti in tensione Le parti sotto tensione devono essere completamente circondate da isolamento se la loro tensione di lavoro supera il limite massimo di DVC A o se non sono separate in modo protettivo dai circuiti adiacenti di DVC C o D. L'isolamento deve essere valutato in base alla tensione impulsiva, alla sovratensione temporanea o alla tensione di esercizio, a seconda di quale richieda requisiti più severi.

Non deve essere possibile rimuovere l'isolamento senza l'uso di uno strumento.

Qualsiasi parte conduttiva che non sia separata dalle parti sotto tensione mediante almeno un isolamento di base è considerata una parte sotto tensione.

Una parte metallica accessibile è considerata conduttiva se la sua superficie è nuda o è ricoperta da uno strato isolante che non soddisfa i requisiti dell'isolamento di base.

Il grado di isolamento da applicare: base, doppio o rinforzato dipende dal DVC delle parti attive o dei circuiti adiacenti e dal collegamento delle parti conduttive a terra tramite collegamento di protezione.

2.2.2.1.2 involucri e "barriere" La protezione mediante involucri e barriere rappresenta un concetto fondamentale nell'ambito dell'ingegneria, soprattutto nei settori dell'ingegneria elettrica, della sicurezza industriale e della tutela ambientale. Tale approccio prevede l'utilizzo di strutture fisiche per proteggere attrezzature, personale e ambiente da vari rischi, tra cui scosse elettriche, impatti meccanici, contaminanti ambientali e altri pericoli. Gli involucri sono progettati per ospitare e proteggere attrezzature o componenti dagli agenti esterni, costituendo una barriera efficace contro polvere, umidità e altri contaminanti, garantendo il corretto funzionamento di attrezzature sensibili. Le barriere, invece, sono ostacoli fisici eretti per impedire l'accesso a zone pericolose o per proteggere gli individui da potenziali rischi, e possono essere installazioni permanenti o temporanee a seconda delle esigenze. La selezione e il design di involucri e barriere dipendono da diversi fattori, come la natura dei rischi, i requisiti specifici delle attrezzature o dei processi da proteggere, nonché le normative e gli standard di sicurezza applicabili.

Le parti sotto tensione dei dispositivi DVC B, C o D devono essere alloggiati in involucri o collocate dietro involucri o barriere che rispettino almeno i requisiti del tipo di protezione IPXXB. Le superfici superiori degli involucri o delle barriere, accessibili quando l'apparecchiatura è sotto tensione, devono soddisfare almeno i requisiti del tipo di protezione IP3X solo per quanto riguarda l'accesso verticale. Gli involucri devono essere apribili o le barriere devono essere rimovibili solo utilizzando uno strumento o dopo aver spento le parti sotto tensione. Nei casi in cui sia necessario aprire l'involucro e alimentare il dispositivo durante l'installazione o la manutenzione:

- le parti sotto tensione accessibili dei dispositivi DVC B, C o D devono essere protette almeno fino a IPXXA;
- le parti sotto tensione dei dispositivi DVC B, C o D che potrebbero essere toccate durante le regolazioni devono essere protette almeno fino a IPXXB;
- deve essere garantito che le persone siano consapevoli dell'accessibilità delle parti sotto tensione dei dispositivi DVC B, C o D.

I sottogruppi e i dispositivi di tipo aperto non richiedono misure di protezione contro il contatto diretto. I prodotti contenenti circuiti DVC A, B o C, destinati all'installazione in aree operative elettriche chiuse, non richiedono misure di protezione contro il contatto diretto. I prodotti contenenti circuiti DVC D, destinati all'installazione all'interno di un'area operativa elettrica chiusa, hanno requisiti aggiuntivi.

2.2.2.2 Protezione in caso di contatti diretti

Le protezioni per prevenire la folgorazione in caso di contatto diretto con una parte sotto tensione sono progettate per garantire tale prevenzione.

Esistono due tipologie di protezione: la prima si basa sull'utilizzo di impedenze protettive (progettate per limitare la corrente verso terra a massimo 3.5mA in AC e 10mA in DC), mentre la seconda consiste nella progettazione del dispositivo in modo che, anche in presenza di un guasto che potrebbe causare un contatto diretto, la tensione non superi un valore limite corrispondente ai limiti di DVC-A.

2.2.3 Contatti indiretti

È necessaria una protezione contro il contatto indiretto per prevenire scosse elettriche che possono derivare da parti accessibili rese conduttive in caso di guasto dell'isolamento. Questa protezione deve essere in conformità con i requisiti delle classi di protezione 1, 2 e 3, le quali sono successivamente indicate:

- Classe 1 :

Le parti conduttrici accessibili delle apparecchiature devono essere separate da parti in tensione almeno mediante un isolamento di base o dalle distanze di sicurezza (Clearance distances) indicate in tabella 9 (Figura 3.1) in aggiunta si deve prevedere una connessione protettiva (protective bonding) tra le parti conduttive accessibili dell'apparecchiatura ed il circuito di messa a terra.

- Classe 2 :

Se l'apparecchiatura è progettata per utilizzare un isolamento doppio o rinforzato tra le parti sotto tensione e le superfici accessibili, allora il progetto è considerato conforme alla classe di protezione 2, a condizione che siano soddisfatte le seguenti condizioni:

- Le apparecchiature progettate per la classe di protezione 2 non devono avere mezzi di collegamento per il conduttore di terra, ad eccezione del caso in cui un conduttore di terra protettivo passi attraverso l'apparecchiatura verso apparecchiature collegate in serie al di là di essa. In quest'ultimo caso, il conduttore di terra protettivo e i suoi mezzi di connessione devono essere isolati con isolamento di base dalla superficie accessibile dell'apparecchiatura e dai circuiti che impiegano separazione protettiva, bassissima tensione, impedenza protettiva ed energia di scarica limitata.
- Le apparecchiature con involucro metallico di classe di protezione 2 possono essere predisposte sulla custodia per il collegamento di un conduttore equipotenziale.
- Gli apparecchi di classe di protezione 2 possono prevedere il collegamento di un conduttore di terra per motivi funzionali o per lo smorzamento delle sovratensioni; dovrà tuttavia essere isolato come se fosse una parte sotto tensione.

- Classe 3 :

Un apparecchio viene definito di classe 3 quando la protezione contro la folgorazione si affida al fatto che non sono presenti tensioni superiori alla bassissima tensione di sicurezza SELV (Safety Extra-Low Voltage). In pratica tale apparecchio viene alimentato o da una batteria o da un trasformatore SELV. La tensione prodotta, inferiore ai 25 Vac o 60 Vdc, è bassa al punto da non essere normalmente pericolosa in caso di contatto con il corpo umano. Gli apparecchi di Classe 3 non devono essere provvisti di messa a terra di protezione.

2.2.4 isolamenti

I requisiti minimi per gli isolamenti si basano sulle norme IEC60664 e 60071, la scelta dell'isolamento più adatto si basa su le seguenti categorie :

- grado di inquinamento
- categoria di sovratensione
- impianto di messa a terra
- tensione di isolamento

2.2.4.1 Grado di inquinamento

Il grado di inquinamento rappresenta una classificazione utilizzata nell'ambito elettronico per valutare il livello di contaminazione che le attrezzature elettriche possono tollerare in differenti ambienti. Questo concetto assume particolare importanza nella progettazione e nella fase di test dei dispositivi elettrici, soprattutto quelli impiegati in contesti industriali o in altre situazioni in cui l'esposizione a contaminanti è frequente.

L'isolamento, specialmente quando garantito attraverso distanze di protezione, è soggetto all'inquinamento che si accumula nel corso della vita prevista del dispositivo. Le condizioni microambientali per l'isolamento devono essere osservate in base a quanto specificato nella Tabella 6.

Table 6 – Definitions of pollution degrees

Pollution degree	Description
1	No pollution or only dry, non-conductive pollution occurs. The pollution has no influence.
2	Normally, only non-conductive pollution occurs. Occasionally, however, a temporary conductivity caused by condensation is to be expected, when the PDS is out of operation.
3	Conductive pollution or dry non-conductive pollution occurs, which becomes conductive due to condensation, which is to be expected.
4	The pollution generates persistent conductivity caused, for example by conductive dust or rain or snow.

Figura 2.3: Tabella 6 gradi di inquinamento

2.2.4.2 Categoria sovratensioni

La categoria delle sovratensioni è riservata ai dispositivi alimentati dalla rete elettrica, vengono indicate 4 categorie

1. la categoria I si applica ai dispositivi con circuiti che minimizzano le sovratensioni
2. la categoria II si applica a dispositivi portatili o che non sono connessi permanentemente a installazioni fisse
3. la categoria III si applica a dispositivi connessi permanentemente a installazioni fisse a valle del quadro generale
4. la categoria IV si applica invece per dispositivi connessi permanentemente a installazioni fisse che montano a monte del quadro generale

2.2.4.3 impianti di messa a terra

I sistemi di messa a terra, sono essenziali per le installazioni elettriche per garantire la sicurezza e proteggere gli apparecchi dall'eventuale danneggiamento causato da guasti elettrici. Esistono tre tipi di base di sistemi di messa a terra comunemente utilizzati:

1. Sistema TN(Terra-Neutro) :

Nel sistema TN, il collegamento a terra viene effettuato in un punto, solitamente al punto neutro del trasformatore o del generatore.

2. Sistema TT(Terra-Terra) :

Nel sistema TT, il collegamento a terra viene effettuato in più punti, con ogni singola installazione elettrica che ha il proprio picchetto di terra dedicato.

3. Sistema IT(Isolato) :

Nel sistema IT, non c'è alcun collegamento intenzionale tra l'installazione elettrica e la terra. Invece, l'installazione è isolata dalla terra e eventuali guasti a terra vengono rilevati e segnalati da sistemi di monitoraggio. Il sistema IT è comunemente usato in installazioni critiche in cui è essenziale la continuità dell'alimentazione, come ospedali, centri dati e alcune applicazioni industriali.

2.2.4.4 tensioni di isolamento

Le tensioni di isolamento sono tensioni elettriche applicate a componenti, apparecchiature o sistemi elettrici al fine di determinare la loro resistenza e affidabilità nell'isolare efficacemente parti conduttive da parti non conduttive o da terra. Le tabelle 7 e 8 utilizzano la tensione di sistema del circuito in questione e la categoria di sovratensione per definire la tensione di impulso. La tensione di sistema viene anche utilizzata per definire la sovratensione temporanea.

Table 7 – Insulation voltage for low voltage circuits

Column 1	2	3	4	5	6
System voltage (4.3.6.2.1) (V)	Impulse voltage (V)				Temporary overvoltage (crest value / r.m.s.) ^a (V)
	Overvoltage category				
	I	II	III	IV	
≤ 50	330	500	800	1 500	1 770 / 1 250
100	500	800	1 500	2 500	1 840 / 1 300
150	800	1 500	2 500	4 000	1 910 / 1 350
300	1 500	2 500	4 000	6 000	2 120 / 1 500
600	2 500	4 000	6 000	8 000	2 550 / 1 800
1 000	4 000	6 000	8 000	12 000	3 110 / 2 200

^a Interpolation of *system voltage* is not permitted when determining the impulse voltage for mains supply. Interpolation of *system voltage* is permitted when determining the *temporary overvoltage* for mains supply.

^b NOTE The last row only applies to single-phase systems, or to the phase-to-phase voltage in three-phase systems.

^c SOURCE: IEC 62477-1:2012, Table 9

^a These values are derived using the formula $(1\ 200\ \text{V} + \text{system voltage})$ from IEC 60664-1.

Figura 2.4: tensioni isolamento per circuiti bassa tensione

Table 8 – Insulation voltage for high voltage circuits

Column 1	2	3	4	5	6
System voltage (4.3.6.2.1) (V)	Impulse voltage (V)				Temporary overvoltage (crest value / r.m.s.) (V)
	Overvoltage Category				
	I	II	III	IV	
> 1 000	4 000	6 000	8 000	12 000	4 250 / 3 000
3 600	9 000 ^a	16 000 ^a	20 000 ^b	40 000 ^b	14 150 / 10 000 ^b
7 200	17 500 ^a	29 000 ^a	40 000 ^b	60 000 ^b	28 300 / 20 000 ^b
12 000	29 000 ^a	42 500 ^a	60 000 ^b	75 000 ^b	39 600 / 28 000 ^b
17 500	40 000 ^a	55 000 ^a	75 000 ^b	95 000 ^b	53 750 / 38 000 ^b
24 000	52 000 ^a	75 000 ^a	95 000 ^b	125 000 ^b	70 700 / 50 000 ^b
36 000	75 000 ^a	95 000 ^a	125 000 ^b	145 000 ^b	99 000 / 70 000 ^b

NOTE 1 Interpolation is permitted.

^a These values have been derived or extrapolated from Tables 4 and 5 of IEC 62103: 2003.

^b These values have been derived or extrapolated from Table 2 of IEC 60071-1:2006.

^c This value has been taken from IEC 60146-1-1, Ed.4 (in preparation).

Figura 2.5: tensioni isolamento per circuiti alta tensione

2.3 Thermal hazards

Il paragrafo "thermal hazards" si riferisce alle disposizioni e ai requisiti specifici per gestire i pericoli termici associati ai convertitori di potenza. Questi pericoli termici possono derivare dalla dissipazione di calore generata durante il funzionamento dei convertitori o da malfunzionamenti del sistema. Il paragrafo stabilisce le misure di protezione e le caratteristiche dei convertitori per gestire in modo sicuro la temperatura e prevenire situazioni di surriscaldamento che potrebbero danneggiare il sistema o mettere a rischio la sicurezza delle persone.

2.3.1 Riduzione rischi di innesco

Per ridurre il rischio di innesco, è essenziale selezionare e dimensionare i componenti elettrici in modo che la temperatura durante il funzionamento, sotto carico normale, rimanga sufficientemente al di sotto della temperatura critica necessaria per innescare un incendio negli elementi circostanti. Le temperature di riferimento sono specificate nella Tabella 15.

Table 15 – Maximum measured temperatures for internal materials and components

	Materials and components	Thermometer method (° C)	Resistance method (° C)
1	Rubber- or thermoplastic-insulated conductors ^a	75	
2	User terminals ^b	c	
3	Copper bus bars and connecting straps	d	
4	Insulation systems		
	Class A (105)	105	125
	Class E (120)	120	135
	Class B (130)	125	145
	Class F (155)	135	155
	Class H (180)	155	175
	Class N (220)	195	215
5	Phenolic composition ^a	165	
6	On bare resistor material	415	
7	Capacitor	e	
8	Power switching semiconductors	f	
9	PWBs	g	
10	Liquid cooling medium	h	

^a The limitation on phenolic composition and on rubber and thermoplastic insulation does not apply to compounds which have been investigated and found to meet the requirements for a higher temperature.

^b The temperature on a wiring terminal or lug is measured at the point most at risk of being contacted by the insulation of a conductor installed as in actual service.

^c The maximum terminal temperature shall not exceed 15 °C more than the insulation temperature rating of the conductor or cable specified by the manufacturer (see 6.3.6.4).

^d The maximum permitted temperature is determined by the temperature limit of support materials or insulation of connecting wires or other components. A maximum temperature of 140 °C is recommended.

^e For a capacitor, the maximum temperature specified by the manufacturer shall not be exceeded.

^f The maximum temperature on the case shall be the maximum case temperature for the applied power dissipation specified by the semiconductor manufacturer.

^g The maximum operating temperature of the PWB shall not be exceeded.

^h The maximum temperature of the cooling medium, specified by the manufacturer of the medium or determined from the known characteristics of the medium, shall not be exceeded.

Figura 2.6: Tabella 15 : temperature di esercizio massime

2.3.2 Materiali isolanti

Per materiali isolanti si indicano quei materiali che vengono usati per il supporto diretto di parti in tensione non isolate, un materiale è considerato in supporto diretto quando :

- il materiale è in contatto fisico diretto con una parte in tensione non isolata
- supporta fisicamente o mantiene la posizione della parte in tensione non isolata

Un materiale isolante per essere utilizzato deve possedere almeno il grado CTI di 100, per applicazioni generiche non sono necessarie ulteriori specifiche nel caso in cui il materiale soddisfi le indicazioni della seguente tabella

Table 14 – Generic materials for the direct support of uninsulated *live parts*

Generic material	Minimum thickness (mm)	Maximum temperature (° C)
Any cold-moulded composition	No limit	No limit
Ceramic, porcelain	No limit	No limit
Diallyl phthalate	0,7	105
Epoxy	0,7	105
Melamine	0,7	130
Melamine-phenolic	0,7	130
Phenolic	0,7	150
Unfilled nylon	0,7	105
Unfilled polycarbonate	0,7	105
Urea formaldehyde	0,7	100

Figura 2.7: Tabella 14 : Indicazioni sui vari materiali per isolamento

I casi in cui non si rispetti quanto indicato nella tabella, è necessario sottoporre il materiale al glow wire test ad una temperatura di 850°C. In alternativa a questo test, è possibile eseguire l'hot wire ignition test.

Nei casi in cui un materiale isolante venga utilizzato in dispositivi che incorporano contatti di commutazione e se tali contatti sono a meno di 12,7 mm dal materiale, è obbligatorio eseguire l' high current arcing ignition test.

2.4 Energy hazards

In questa sezione della normativa IEC 61800-5, non sono stabilite regolamentazioni vincolanti, ma vengono fornite indicazioni "per presa visione". Questo significa che non sono imposti requisiti obbligatori, ma vengono suggeriti criteri e linee guida che gli operatori e i progettisti possono prendere in considerazione per garantire la sicurezza dei dispositivi elettronici.

Uno degli aspetti fondamentali trattati in questa sezione riguarda la gestione dei guasti dei componenti all'interno degli apparecchi elettronici. Si sottolinea che, in caso di guasto di qualsiasi componente, è essenziale che l'evento non comporti il rilascio di energia sufficiente a costituire un pericolo per gli operatori, l'ambiente circostante o altre apparecchiature. Ad esempio, è fondamentale evitare situazioni in cui il guasto di un componente possa causare l'espulsione di materiale o la generazione di calore eccessivo in aree occupate da persone.

Capitolo 3

Prove di Guasto

3.1 Informazioni generali

I test servono a dimostrare che le schede elettroniche siano conformi alla IEC 61800.

Vengono classificate 3 tipologie di test

- **type test**

Il type test fornisce una valutazione completa condotta su un campione rappresentativo di un prodotto al fine di verificare la sua conformità a specifiche normative, specifiche o requisiti. A differenza del test su campione (sample test), che valuta un sottoinsieme di articoli da un ampio lotto, il type test prevede di sottoporre un singolo campione rappresentativo, solitamente un prototipo o un'unità pre-produzione, a una serie di test rigorosi che coprono vari aspetti di prestazione, sicurezza, durata e altri criteri rilevanti. Lo scopo del test di tipo è garantire che il design del prodotto soddisfi le norme e le specifiche stabilite, fornendo un'assicurazione di qualità e prestazioni costanti su tutte le unità prodotte secondo tale design

- **Routine test**

Un test di routine è una procedura regolare e standardizzata eseguita su singole unità o lotti di prodotti durante il processo di produzione per garantire che essi rispettino specifiche predefinite, standard di qualità o requisiti normativi.

Il test di routine si concentra sulla verifica della coerenza e affidabilità dei processi produttivi attraverso la valutazione della qualità e delle prestazioni dei prodotti in varie fasi della produzione.

I test di routine vengono tipicamente condotti utilizzando metodi di test e attrezzature stabilite e possono includere ispezioni visive, misurazioni, test funzionali e altre valuta-

zioni pertinenti. La frequenza e l'ambito dei test di routine vengono determinati in base a fattori come la natura del prodotto, il volume di produzione, la criticità dei parametri di prestazione e le normative del settore.

- **Sample test**

Un test su campione è una procedura di controllo qualità in cui viene selezionato e testato un sottoinsieme di articoli o prodotti da un ampio lotto al fine di valutarne la qualità, le caratteristiche o la conformità ai criteri, alle specifiche o ai requisiti predefiniti. I risultati del test su campione vengono utilizzati per trarre inferenze sull'intera produzione del lotto, consentendo una valutazione efficiente e minimizzando il tempo e le risorse necessarie per l'ispezione. Questo metodo è comunemente utilizzato in vari settori per garantire la qualità del prodotto, individuare difetti e prendere decisioni informate sull'accettazione o il rifiuto di lotti.

Quando si devono testare più componenti uguali e/o simili, non è sempre necessario eseguire i test su ciascun singolo componente. È ammesso condurre test su un singolo o su pochi componenti in modo che possano adeguatamente rappresentare l'intera tipologia dei componenti. Non sono fornite sequenze specifiche per l'esecuzione dei test; è lasciata alla discrezionalità del tester. Questo approccio consente di posticipare eventuali prove distruttive per ultime, evitando così l'impiego inutile di un elevato numero di campioni.

3.2 Specifiche delle prove

Il paragrafo riguarda le linee guida e i criteri specifici per condurre test e prove sui convertitori di potenza. Queste specifiche dettagliano i metodi di prova, le condizioni di test e i criteri di accettazione per valutare le prestazioni, la sicurezza e la conformità dei convertitori rispetto agli standard stabiliti dalla normativa. Le prove possono includere test di funzionamento, test di sicurezza e altri test pertinenti per garantire che i convertitori soddisfino gli standard di qualità e sicurezza richiesti.

3.2.1 Prove "meccaniche"

In questo paragrafo vengono delineati i criteri per condurre test riguardanti le proprietà meccaniche degli isolamenti. Si forniscono indicazioni specifiche sulle distanze da rispettare e sulle tensioni di esercizio massime al fine di garantire l'integrità e la sicurezza degli isolamenti. Queste direttive sono cruciali per valutare la robustezza e l'affidabilità degli isolamenti utilizzati nei convertitori di potenza elettrica, assicurando che soddisfino gli standard di qualità e sicurezza definiti dalla normativa.

3.2.1.1 Distanze e dispersioni

Si verificano i parametri indicati nelle tabelle 9 e 10, nel caso non sia possibile effettuare le verifiche o comunque esse non possano essere rispettate si procede alla verifica attraverso impulse voltage test (paragrafo 3.2.2.1)

Table 9 – Clearance distances

Column 1	2	3	4 5 6		
			Minimum clearance mm		
Impulse voltage (Table 7, Table 8, 4.3.6.3)	Temporary overvoltage (crest value) for determining insulation between surroundings and circuits or Working voltage (recurring peak) for determining functional insulation	Working voltage (recurring peak) for determining insulation between surroundings and circuits	Pollution degree		
			1	2	3
(V)	(V)	(V)	1	2	3
N/A	≤ 110	≤ 71	0,01	0,20 ^a	0,80
N/A	225	141	0,01	0,20	0,80
330	340	212	0,01	0,20	0,80
500	530	330	0,04	0,20	0,80
800	700	440	0,10	0,20	0,80
1 500	960	600	0,50	0,50	0,80
2 500	1 600	1 000	1,5		
4 000	2 600	1 600	3,0		
6 000	3 700	2 300	5,5		
8 000	4 800	3 000	8,0		
12 000	7 400	4 600	14		
20 000	12 000	7 600	25		
40 000	26 000	16 000	60		
60 000	37 000	23 000	90		
75 000	48 000	30 000	120		
95 000	61 000	38 000	160		
125 000	80 000	50 000	220		
145 000	99 000	60 000	270		

NOTE 1 Interpolation is permitted.

NOTE 2 Examples of clearance distances are given in Annex C.

NOTE 3 Clearances for *temporary overvoltage* and *working voltage* have been derived from Table A.1 of IEC 60664-1. In column 2, the voltage is approximately 80 % of the withstand voltage; in column 3, the voltage is approximately 50 % of the withstand voltage.

^a 0,1 mm on PWB

Figura 3.1: Tabella 9

Table 10 – Creepage distances (mm)

Column 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Working voltage (r.m.s.) (V)	PWBs ^a		Other insulators								
	Pollution degree		Pollution degree								
	1	2	1			2			3		
	b	c	b	Insulating material group		Insulating material group					
			I	II	IIIa	IIIb	I	II	IIIa	IIIb	
≤ 2	0,025	0,04	0,056	0,35	0,35	0,35	0,87	0,87	0,87		
5	0,025	0,04	0,065	0,37	0,37	0,37	0,92	0,92	0,92		
10	0,025	0,04	0,08	0,40	0,40	0,40	1,0	1,0	1,0		
25	0,025	0,04	0,125	0,50	0,50	0,50	1,25	1,25	1,25		
32	0,025	0,04	0,14	0,53	0,53	0,53	1,3	1,3	1,3		
40	0,025	0,04	0,16	0,56	0,80	1,1	1,4	1,6	1,8		
50	0,025	0,04	0,18	0,60	0,85	1,20	1,5	1,7	1,9		
63	0,04	0,063	0,20	0,63	0,90	1,25	1,6	1,8	2,0		
80	0,063	0,10	0,22	0,67	0,95	1,3	1,7	1,9	2,1		
100	0,10	0,16	0,25	0,71	1,0	1,4	1,8	2,0	2,2		
125	0,16	0,25	0,28	0,75	1,05	1,5	1,9	2,1	2,4		
160	0,25	0,40	0,32	0,80	1,1	1,6	2,0	2,2	2,5		
200	0,40	0,63	0,42	1,0	1,4	2,0	2,5	2,8	3,2		
250	0,56	1,0	0,56	1,25	1,8	2,5	3,2	3,6	4,0		
320	0,75	1,6	0,75	1,6	2,2	3,2	4,0	4,5	5,0		
400	1,0	2,0	1,0	2,0	2,8	4,0	5,0	5,6	6,3		
500	1,3	2,5	1,3	2,5	3,6	5,0	6,3	7,1	8,0		
630	1,8	3,2	1,8	3,2	4,5	6,3	8,0	9,0	10,0		
800	2,4	4,0	2,4	4,0	5,6	8,0	10,0	11	12,5	*	
1 000	3,2	5,0	3,2	5,0	7,1	10,0	12,5	14	16		
1 250	4,2	6,3	4,2	6,3	9	12,5	16	18	20		
1 600	f	f	5,6	8,0	11	16	20	22	25		
2 000			7,5	10,0	14	20	25	28	32		
2 500			10,0	12,5	18	25	32	36	40		
3 200			12,5	16	22	32	40	45	50		
4 000			16	20	28	40	50	56	63		
5 000			20	25	36	50	63	71	80		
6 300			25	32	45	63	80	90	100		
8 000			32	40	56	81	100	110	125		
10 000			40	50	71	100	125	140	160		
12 500			50	63	90	125	d	d	d		
16 000			63	80	110	150					
20 000			80	100	140	200					
25 000			100	125	180	250					
32 000			125	160	220	320					

NOTE: Interpolation is permitted.

^a These columns also apply to components and parts on PWBs, and to other creepage distances with a comparable control of tolerances.

^b All material groups

^c All material groups except IIIb

^d Values for creepage distances are not determined for this range.

^e Insulating materials of group IIIb are not normally recommended for pollution degree 3 above 630V.

^f above 1 250 V use the values from columns 4 to 11, as appropriate.

Figura 3.2: Tabella 10

3.2.1.2 Cortocircuito

Nei casi in cui, come precedentemente constatato, non vengano rispettati i valori indicati nelle tabelle 9 e 10, è necessario effettuare anche un test di corto circuito dove si prendono in esame le piste poste a distanze ridotte e vi si effettua una giunzione per causare un corto circuito. Viene posto del cotone chirurgico in vari punti del prodotto e a fine test si va a verificare che il cotone non abbia bruciato, che le connessioni di terra non si siano compromesse e/o in generale che l'involucro/struttura della scheda non evidenzino danni.

3.2.2 Prove elettriche

Il paragrafo fornisce linee guida e criteri per condurre test sulle caratteristiche elettriche dei convertitori di potenza. Questi test sono progettati per valutare la conformità dei convertitori agli standard di sicurezza e di prestazioni elettriche definiti dalla normativa. Le prove elettriche possono includere test di isolamento, test di resistenza a shock elettrici, test di sovraccarico,

test di funzionamento a diverse tensioni e altre prove pertinenti per garantire che i convertitori soddisfino i requisiti di sicurezza e funzionalità stabiliti.

3.2.2.1 Impulso di tensione

Table 18 – Impulse voltage test

Subject	Test conditions			
Test reference	Clause 19, 20.1.1 and Figure 6 of IEC 60060-1; 4.1.1.2.1 of IEC 60664-1			
Requirement reference	According to 4.3.3.2, 4.3.4.3 and 4.3.6			
Preconditioning	<i>Live parts</i> belonging to the same circuit shall be connected together. <i>Protective impedances</i> shall be disconnected unless required to be tested. Impulse voltage to be applied: 1) between circuit under test and the surroundings; and 2) between circuits to be tested. Power is not applied to circuits under test.			
Initial measurement	According to specification of <i>PDS</i> , component, or device			
Test equipment	Impulse generator 1,2/50 μ s with an effective internal impedance not higher than: 2 Ω for testing clearances and limiting devices; and 500 Ω for testing solid insulation and components.			
Measurement and verification	<p>a)</p> <p>Clearances smaller than required by Table 9</p> <p>Clearances reduced by overvoltage limiting means or by circuit characteristics</p> <p>Solid <i>basic or supplementary insulation</i></p>	<p>b)</p> <p>Solid <i>reinforced insulation</i></p> <p>Clearances, components and devices for <i>protective separation</i></p>		
Test voltage	<p>Three pulses 1,2/50 μs of each polarity in ≥ 1 s interval, peak voltage ($\pm 5\%$) according to:</p> <table border="1"> <tr> <td>column 2 or column 4 of Table 19, column 2 or column 4 of Table 20, as appropriate</td> <td>column 3 or column 5 of Table 19, column 3 or column 5 of Table 20, as appropriate</td> </tr> </table> <p>When the test is carried out on a clearance at an altitude less than 2 000 m, the test voltage shall be increased according to Table 5 (and 4.1.1.2.1.2) of IEC 60664-1, which is reproduced as Impulse tests performed below 2000 m altitude for the purpose of verifying air clearances must use test voltages which have been corrected for air pressure (altitude). Test voltages which have been corrected for three altitudes are provided in Table D.2. Altitude correction of test voltage is not required for impulse testing of solid insulation. The voltage values of Table D.2 apply for the verification of clearances only.</p> <p>Table D.2 in this international standard.</p>		column 2 or column 4 of Table 19, column 2 or column 4 of Table 20, as appropriate	column 3 or column 5 of Table 19, column 3 or column 5 of Table 20, as appropriate
column 2 or column 4 of Table 19, column 2 or column 4 of Table 20, as appropriate	column 3 or column 5 of Table 19, column 3 or column 5 of Table 20, as appropriate			

Figura 3.3: Tabella 18 : Impulse voltage test

3.2.2.2 Tensione AC/DC

Il test di impulso di tensione viene condotto tramite un'apposita strumentazione, dove sono già preimpostati vari parametri del test. In generale, si utilizza il test 1,2/50, il quale implica l'applicazione di un impulso di tensione con un tempo di salita (T_r) di 1,2 microsecondi e un tempo

di decadimento di 50 microsecondi, durante il quale la tensione si riduce della metà.

Questo test è progettato per simulare sia le sovratensioni di origine atmosferica sia quelle derivanti dalla commutazione delle apparecchiature.

Il test di tensione AC-DC, noto anche come test di resistenza dielettrica o test ad alta tensione (hipot), è una procedura essenziale nei test elettrici utilizzata per valutare l'integrità dell'isolamento nei componenti e negli apparecchi elettrici.

Questo test è particolarmente importante per garantire la sicurezza e l'affidabilità nei sistemi elettrici identificando eventuali punti deboli o punti di rottura nell'isolamento.

Lo scopo del test è di verificare che tutti gli isolamenti abbiano effettivamente una sufficiente rigidità dielettrica per resistere a condizioni di sovratensione.

Le tabelle 21 e 22 forniscono indicazioni per lo svolgimento del test.

Table 21 – A.C. or d.c. test voltage for circuits connected directly to low voltage mains

Column 1 <i>System voltage</i> (see 4.3.6.2.1)	2 <i>Voltage for type testing circuits with basic insulation, and for all routine testing</i>		3 ^b <i>Voltage for type testing circuits with protective separation, and between circuits and accessible surfaces (non-conductive or conductive but not connected to protective earth, protective class II according to 4.3.5.6)</i>	
	(V)	a.c. r.m.s. ^a (V)	d.c. (V)	a.c. r.m.s. (V)
≤ 50	1 250	1 770	2 500	3 540
100	1 300	1 840	2 600	3 680
150	1 350	1 910	2 700	3 820
300	1 500	2 120	3 000	4 240
600	1 800	2 550	3 600	5 090
1 000	2 200	3 110	4 400	6 220

NOTE Interpolation is permitted.

^a Corresponding to 1 200 V + *system voltage*.

^b A voltage source with a short-circuit current of at least 0,1 A according to 5.2.2.2 of IEC 61180-1 is used for this test.

Figura 3.4: Tabella 21

3.2.2.3 Cortocircuito

Il test di corto circuito, è una valutazione fondamentale condotta su apparecchiature elettriche, come trasformatori, interruttori e cavi, per determinarne la capacità di resistere a correnti di corto circuito senza subire danni o guasti.

I corto circuiti possono essere causati da vari fattori, tra cui guasti all'isolamento, malfunzionamenti dell'apparecchiatura o contatto accidentale con materiali conduttivi.

Durante il test di corto circuito, l'apparecchiatura in valutazione viene sottoposta a una condizione simulata di corto circuito mediante l'applicazione di una fonte di corrente elevata diretta-

mente ai suoi terminali o in alternativa durante la fase di funzionamento al caso peggiore viene instaurato fisicamente sull'apparato un cortocircuito. In conclusione, il test di corto circuito è una valutazione critica condotta su apparecchiature elettriche per valutarne la capacità di resistere a correnti di corto circuito senza subire danni o guasti. Sottoponendo l'apparecchiatura a condizioni simulate di guasto, il test aiuta a garantire la sicurezza, l'affidabilità e la conformità delle installazioni elettriche alle normative del settore e ai requisiti normativi.

I requisiti per superare il test sono i medesimi indicati al paragrafo 3.2.1.2 .

3.2.2.4 Temperature rise test

Il test ha lo scopo di garantire che le parti e le superfici accessibili del dispositivo non superino i limiti di temperatura specificati e che i limiti di temperatura del produttore delle parti rilevanti per la sicurezza non vengano superati. Dove possibile, il dispositivo dovrebbe essere testato nel caso peggiore relativo alle condizioni di potenza e corrente di output. Nel caso non sia possibile eseguire il test nel caso peggiore, è consentito simulare il temperature rise test a potenze minori, a condizione che la validità del test sia dimostrata.

Il dispositivo deve essere testato con almeno 1,2 m di cavo collegato a ciascun terminale utente. La prova dovrà essere mantenuta fino al raggiungimento della stabilizzazione termica, ossia quando tre letture successive, effettuate ad intervalli pari al 10% della durata della prova precedentemente trascorsa e ad intervalli non inferiori a 10 minuti, non indicano alcun cambiamento di temperatura superiore a ± 1 °C rispetto alla temperatura ambiente.

La temperatura massima dell'isolamento elettrico il cui guasto potrebbe causare pericolo, viene misurata sulla superficie dell'isolante in un punto vicino alla fonte di calore.

La temperatura massima raggiunta deve essere corretta in base alla temperatura ambiente nominale del dispositivo, aggiungendo la differenza tra la temperatura ambiente durante la prova e la temperatura ambiente nominale massima. Nessuna temperatura misurata deve superare la temperatura nominale del materiale o del componente. Durante la prova, l'interruttore termico, le funzioni e i dispositivi di rilevamento del sovraccarico non devono essere attivi.

3.2.3 Condizioni anomale

La norma include anche test di funzionamento in condizioni anomale. La procedura per condurre tali test prevede di simulare una configurazione normale di utilizzo, seguita dall'avvio dei test durante i quali vengono create condizioni di funzionamento anomalo. Durante il montaggio, è necessario collocare il cotone chirurgico in vari punti all'esterno del dispositivo, il quale sarà poi utilizzato per le verifiche. I test devono rispettare le seguenti indicazioni per essere superati:

- Non devono svilupparsi fiamme o fusioni di metalli

- il cotone non deve prendere fuoco
- il collegamento di terra non deve aprirsi
- l'involucro non deve danneggiarsi
- durante ed in seguito al test non devono rendersi accessibili parti in tensione superiore alla classe DVC-A

3.2.3.1 Perdita di una fase

Un apparecchio multifase deve essere utilizzato con ciascuna linea, compreso il neutro se in uso, disconnessa a turno dall'ingresso.

Il test deve essere eseguito scollegando una linea mentre l'apparecchiatura di potenza funziona al suo carico massimo nominale (questo requisito particolare non si applica ai dispositivi ad alta tensione e può essere simulato per dispositivi a bassa tensione con una corrente di ingresso nominale superiore a 500 A) e deve essere ripetuto energizzando inizialmente il dispositivo con un cavo scollegato.

3.2.3.2 Guasto del raffreddamento

Per apparecchiature aventi una combinazione di meccanismi di raffreddamento sono previste queste prove :

- guasto alla ventilazione :
Un dispositivo a ventilazione forzata deve essere messo in funzione al carico nominale, con il motore o i motori del ventilatore resi fuori servizio, singolarmente o in combinazione a causa di un unico guasto, impedendone fisicamente la rotazione.
- filtro occluso :
Un dispositivo chiuso , dotato di aperture di ventilazione con filtri , deve essere utilizzato con le aperture bloccate per simulare un'intasatura dei filtri. La prova deve essere inizialmente eseguita con le aperture di ventilazione bloccate al 50%, e poi ripetuta in condizione completamente bloccata.
- perdita di liquido refrigerante :
Un dispositivo raffreddato a liquido deve essere utilizzato al carico nominale. La perdita di liquido refrigerante deve essere simulata bloccando il flusso o disabilitando la pompa del liquido refrigerante del sistema.

3.2.4 Prove dei materiali

Il paragrafo fornisce linee guida e criteri specifici per condurre test e prove sui materiali utilizzati nella costruzione dei convertitori di potenza elettrica. Questi test sono progettati per valutare la qualità, la resistenza e la durabilità dei materiali utilizzati, assicurando che siano adatti all'uso previsto e che soddisfino gli standard di sicurezza e prestazioni definiti dalla normativa. Le prove dei materiali possono includere test di resistenza meccanica, test di resistenza alle alte temperature e altri test pertinenti per garantire l'integrità e l'affidabilità dei materiali impiegati nei convertitori di potenza.

3.2.5 glow wire

Il glow wire test, è un test standardizzato utilizzato per valutare la resistenza al fuoco e la sicurezza degli materiali isolanti e dei componenti elettrici utilizzati negli apparecchi elettrici ed elettronici. Questo test è progettato per simulare le condizioni di incendio in cui un materiale può entrare in contatto con una sorgente di calore.

Lo scopo principale del test del filo incandescente è valutare la resistenza al fuoco dei materiali isolanti e dei componenti elettrici per garantire che mantengano l'integrità strutturale e non contribuiscano alla propagazione delle fiamme in caso di incendio.

Durante il test, un filo di metallo incandescente viene portato a una temperatura specifica, generalmente tra 550°C e 960°C, e applicato al campione del materiale isolante o del componente elettrico per un periodo di tempo definito.

Durante l'esposizione al filo incandescente, vengono valutati vari parametri, tra cui la capacità del materiale di autoestinguersi, la formazione di gocce incandescenti, il rilascio di gas infiammabili e altri comportamenti che potrebbero influenzare la sicurezza in caso di incendio.

La prova viene considerata superata se il campione non si infiamma o se la fiamma innescata si estingue entro i 30 secondi dopo la rimozione del filo incandescente

3.2.6 Prove climatiche

Le prove climatiche vengono effettuate allo scopo di stabilire la sicurezza del dispositivo nelle condizioni climatiche limite in cui il dispositivo dovrà operare. I criteri da soddisfare sono :

- nessun degrado di alcun componente rilevante per la sicurezza
- nessun comportamento potenzialmente pericoloso del dispositivo durante lo svolgimento del test
- assenza di segni di surriscaldamento
- nessuna parte in tensione deve diventare accessibile
- assenza di segni di degrado/rotture su involucri

Le prove dry heat e damp heat vengono svolte con l'uso di camere climatiche dove vengono posti i dispositivi sotto test.

3.2.6.1 Dry heat

Il dry heat test è una procedura fondamentale utilizzata per valutare la resistenza e le prestazioni di questi componenti quando esposti a temperature elevate in un ambiente a bassa umidità.

Lo scopo principale del test è determinare la capacità dei componenti elettrici, come trasformatori, interruttori, conduttori elettrici, e altri dispositivi, di resistere a temperature elevate senza subire alterazioni nelle loro proprietà o performance.

Durante il dry heat test , i componenti elettrici vengono collocati in un ambiente controllato, come una camera climatica o un forno appositamente progettato, dove la temperatura è gradualmente aumentata a livelli elevati.

Durante il periodo di prova, vengono monitorate varie caratteristiche dei componenti, come temperatura di surriscaldamento, resistenza elettrica, isolamento, e altre proprietà specifiche del componente in esame.

I criteri di valutazione includono il mantenimento delle caratteristiche elettriche specificate, l'integrità dell'isolamento, la resistenza meccanica e la stabilità dimensionale.

Table 25 – Dry heat test (steady state)

Subject	Test conditions
Test reference	Test Bd of IEC 60068-2-2
Requirement reference	4.6
Preconditioning	According to 5.1.2 and 5.2.1
Operating conditions	Operating at rated conditions
Temperature	40 °C or manufacturer's specified maximum temperature, whichever is higher
Accuracy	± 2 °C (see 37.1 of IEC 60068-2-2)
Humidity	According to IEC 60068-2-2, Test Bd
Duration of exposure	(16 ± 1) h
Recovery procedure	
- time	1 h minimum
- climatic conditions	
- Temperature	15 °C to 35 °C
- Relative humidity	25 % to 75 %
- Barometric pressure	86 kPa to 106 kPa
- power supply	Power supply unconnected

Figura 3.5: Tabella 25

3.2.6.2 damp heat

Il Damp heat test è un metodo di valutazione cruciale utilizzato per valutare la capacità di componenti di sopportare elevati livelli di umidità e temperature elevate per un periodo prolungato.

Lo scopo principale del damp heat test è valutare la resistenza dei componenti elettrici, come interruttori, connettori, schede circuito e cavi, alle variazioni di umidità e temperatura che possono verificarsi durante la loro vita utile.

Questo test aiuta a identificare potenziali problemi legati a corrosione, rottura dell'isolamento, degradazione dei materiali e altri problemi correlati alle prestazioni causati dall'esposizione ad elevata umidità e temperature elevate.

Durante il damp heat test, i componenti elettrici vengono collocati in una camera climatica dove i livelli di temperatura e umidità sono controllati e mantenuti a livelli predeterminati, tipicamente elevati livelli di umidità circa 93% e temperature elevate circa 40 °C .

Dopo il completamento del test, i componenti vengono esaminati e valutati attentamente per eventuali cambiamenti o danni risultanti dall'esposizione ad alta umidità e temperature elevate.

La valutazione può includere ispezioni visive, misurazioni delle proprietà elettriche, prove meccaniche e altre valutazioni pertinenti per determinare gli effetti dell'esposizione all'umidità sui componenti e la loro affidabilità e prestazioni.

Table 26 – Damp heat test (steady state)

Subject	Test conditions
Test reference	Test Cab of IEC 60068-2-78
Requirement reference	4.6
Preconditioning	According to 5.1.2 and 5.2.1
Operating conditions	Power supply disconnected
Special precautions	Internal voltage sources may remain connected if the heat produced by them in the specimen is negligible
Temperature	(40 ± 2) °C (according to IEC 60068-2-78)
Humidity	(93 $\begin{smallmatrix} +2 \\ -3 \end{smallmatrix}$) % non-condensing
Duration of exposure	4 Days
Recovery procedure	
- time	1 h minimum
- climatic conditions	
- Temperature	15°C to 35°C
- Relative humidity	25% to 75%
- Barometric pressure	86 kPa to 106 kPa
- power supply	Power supply disconnected
- condensation	All external and internal condensation shall be removed by air flow prior to performing the a.c. or d.c. voltage test or re-connecting the CDM to a power supply

Figura 3.6: Tabella 26

3.2.7 Prove di sovraccarico in output

La prova di sovraccarico è atta a dimostrare in modo rappresentativo il funzionamento delle protezioni da sovraccarico in output entro i limiti specificati.

La preparazione della prova consiste nel montare, collegare e operare alle temperature di funzionamento il dispositivo, in seguito si può procedere alla condizione di sovraccarico.

Le condizioni di sovraccarico vengono fornite nella seguente tabella (tabella 29 pg 85)

Capitolo 4

La scheda in esame

La scheda analizzata è un convertitore buck a bassa tensione con anello di regolazione della tensione di uscita. Viene utilizzata in laboratorio per mettere a confronto varie modalità di controllo (diretto, tensione corrente) per la regolazione della tensione di uscita. Per effettuare la regolazione della tensione di uscita si sfrutta un ramo di retroazione che preleva la V_{out} , toglie la componente di errore all'uscita, modula il segnale che verrà utilizzato come modulante per un comparatore PWM che sarà atto al comando del driver che a sua volta agirà sull'apertura e chiusura dello switch avendo come effetto la regolazione di V_{out} .

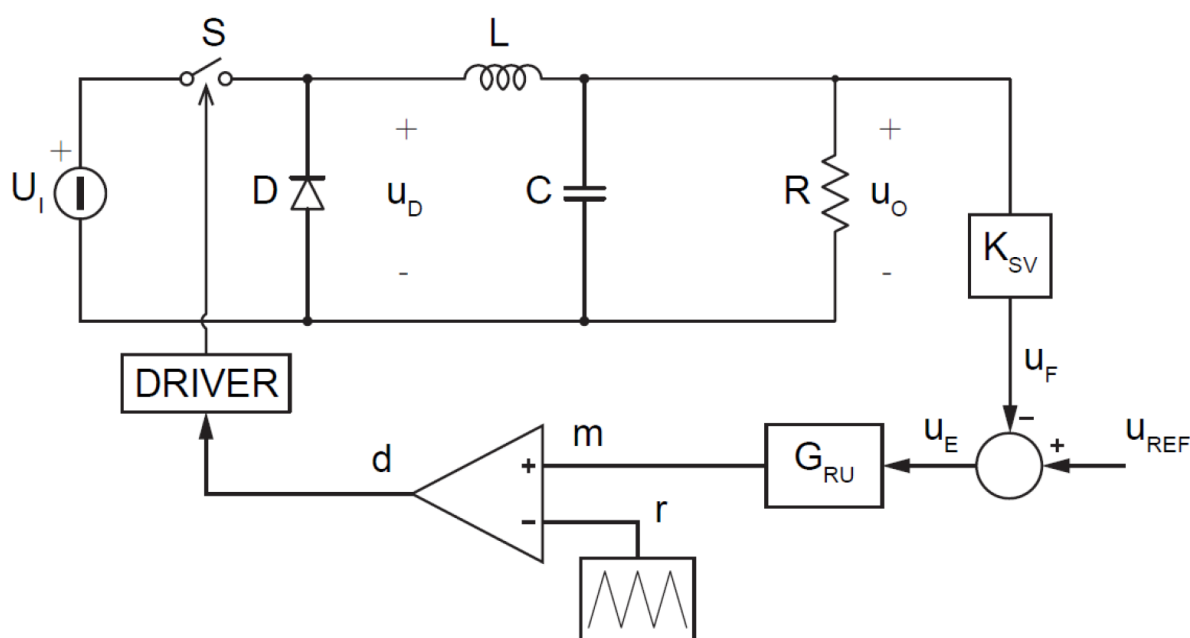


Figura 4.1: Schema elettrico buck

Possiamo analizzare la composizione della scheda con i vari test point (connettori BNC) per analizzare attraverso l'oscilloscopio le tensioni nei vari punti, sono presenti lungo i rami di source, drain e gate delle predisposizioni per l'acquisizione della corrente sempre mediante oscilloscopio.

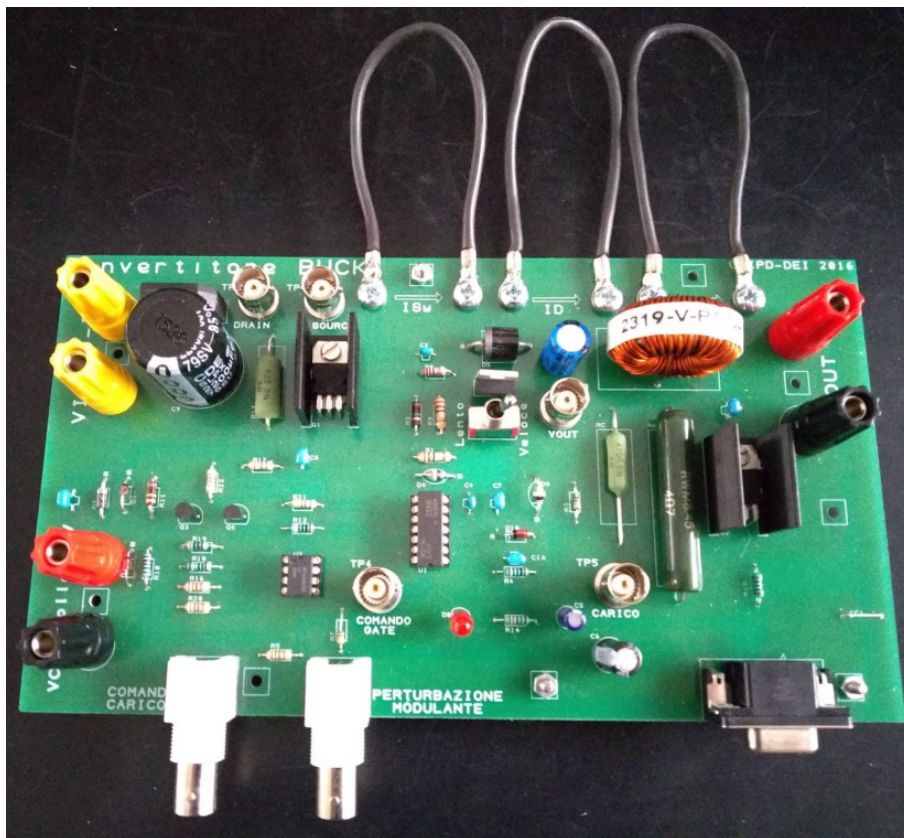


Figura 4.2: Scheda buck

Vediamo rappresentate nell' immagine 4.3 le schede atte al controllo del segnale portante il quale viene comparato alla modulante di V_{out} , attuando quindi la modulazione PWM che controllerà il circuito.

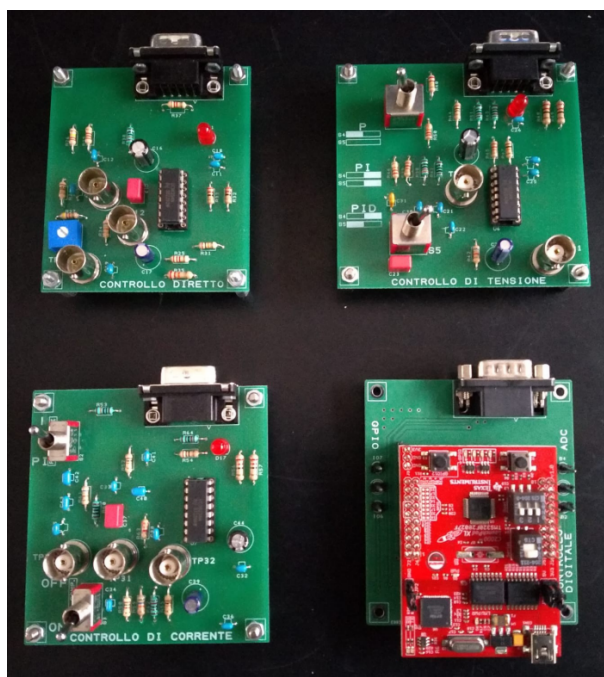


Figura 4.3: schede di controllo

4.1 Classificazione della scheda

Sulla scheda sono presenti due circuiti di input di potenza, sono entrambi in Dc, il primo corrisponde all' alimentazione del mosfet ed è massimo 15V , il secondo circuito invece è la tensione V_{in} (indicata in figura 4.1) ed prevista sia massimo 30V.

Sul blocco di retroazione sono presenti segnali variabili alternati ma sono sempre inferiori a 25V(RMS).

Confrontando i valori di tensione con i valori indicati nella figura 2.1 possiamo quindi classificare la scheda come appartenente alla categoria DVC-A.

4.1.1 valutazione dei rischi e delle sicurezze da adottare

Essendo classificata DVC-A la scheda ha dei requisiti più bassi da rispettare o in alcuni casi i requisiti vengono annullati, ne consegue che la lista di prove è inferiore e meno complessa. Contatti diretti :

- Essendo DVC-A le parti normalmente in tensione possono non essere completamente isolate e non vi sono richieste barriere/involucri protettivi delle stesse, non vi è richiesto quindi un isolamento oltre all' isolamento funzionale (necessario per il funzionamento della scheda ma non dal punto di vista di protezione dell'utente).

- Contatti indiretti:
Essendo DVC-A non avendo requisiti per la protezione da contatti diretti con parti in tensione, va verificato che nel caso in cui una parte normalmente non in tensione a causa di un guasto dell' isolamento risulti in tensione ma con valori che rientrano dentro la categoria DVC-A.
- Categoria sovratensioni :
La scheda principalmente è un dispositivo portatile e non connesso permanentemente ad installazioni fisse quindi rientra nella categoria II, per la prova di tensione di isolamento si avrà come riferimento la tabella 7(figura 2.3).

4.2 Prove di guasto

Per le prove di guasto vi è fornita una tabella (figura 4.4)dove sono indicati tutti i test che è possibile svolgere (non vi è obbligo di svolgerli tutti perché in base al prodotto i test necessari possono variare).

Nel caso della scheda buck le prove da sostenere sono :

- Clearance and creepage distance (Distanze e dispersioni)
- Breakdown of components(Guasto dei componenti)
- Corto circuito
- Temperature rise
- Dry heat
- Damp heat

Table 17 – Test overview

Test	Type	Routine	Sample	Requirement(s)	Specification
Visual inspection	X	X	X		5.2.1
Mechanical tests					5.2.2
Clearance and creepage distances	X			4.3.6.1, 4.3.6.4, 4.3.6.5	5.2.2.1
PWB short-circuit	X			4.3.6.7	5.2.2.2
Non-accessibility	X			4.3.3.3	5.2.2.3
Enclosure integrity	X			4.3.7.1	5.2.2.4
Deformation tests				4.3.6.4.3	5.2.2.5
Deflection	X			4.3.7.1	5.2.2.5.2
Impact	X			4.3.7.1	5.2.2.5.3
Electrical tests				4.3.4.1, 4.3.6.8.2	5.2.3
Impulse voltage	X		X	4.3.3.2, 4.3.4.3, 4.3.6.1, 4.3.6.8.2.1, 4.3.6.8.2.2, 4.3.6.8.3	5.2.3.1
a.c. or d.c. voltage	X	X		4.3.3.2, 4.3.4.3, 4.3.6.1, 4.3.6.8.2.1, 4.3.6.8.2.2, 4.3.6.8.4.2	5.2.3.2
Partial discharge	X		X	4.3.6.1, 4.3.6.8.2.2, 4.3.6.8.3	5.2.3.3
<i>Protective impedance</i>	X	X		4.3.4.3	5.2.3.4
<i>Touch current measurement</i>	X			4.3.5.5.2	5.2.3.5
Short-circuit test	X			4.3.9	5.2.3.6.3
Breakdown of components	X			4.2	5.2.3.6.4
Capacitor discharge	X			4.3.11	5.2.3.7
Temperature rise	X			4.3.8.8.2, 4.4.2.1	5.2.3.8
<i>Protective bonding</i>	X	X		4.3.5.3	5.2.3.9
Abnormal operation tests				4.2	5.2.4
Ⓜ <i>Electronic motor overload protection test</i>	X			5.2.8	4.4.6.2, 4.4.6.3, 4.4.6.4
Circuit functionality evaluation		X	X	5.2.9	4.3.9, 4.4.6.2 Ⓜ
Loss of phase	X			4.2	5.2.4.4
Inoperative blower	X			4.2	5.2.4.5.2
Clogged filter	X			4.2	5.2.4.5.3
Loss of coolant	X			4.4.5.2.5	5.2.4.5.4
Material tests					5.2.5
High current arcing ignition	X			4.4.2.2	5.2.5.1
Glow-wire	X			4.4.2.2	5.2.5.2
Hot wire ignition	X			4.4.2.2	5.2.5.3
Flammability	X			4.4.3	5.2.5.4
Environmental tests				4.6	5.2.6
Dry heat	X			4.6	5.2.6.3.1
Damp heat	X			4.6	5.2.6.3.2
Vibration test	X			4.6	5.2.6.4
Hydrostatic pressure	X	X		4.4.5.2.2	5.2.7

Figura 4.4: Tabella 17

4.2.1 dimostrazione delle prove

- Clearance and creepage distance (Distanze e dispersioni):
In questa prova si vanno a verificare le distanze tra le varie piste sulla scheda, gli strumenti utilizzabili possono essere calibro e/o microscopio, nel nostro caso si nota che nella scheda tutte le distanze rispettano le indicazioni della tabella 10 (Figura 3.2).
- Corto circuito :
Questa prova verrà svolta al termine del processo di testing, essendo una prova potenzialmente distruttiva o che comunque può comportare alterazioni della scheda.
Per la prova di cortocircuito all' output del buck è stato inserito un carico (Resistenza) per avere il caso peggiore; alimentata la scheda e raggiunto il regime di funzionamento, attraverso uno switch si cortocircuita il carico.
- Breakdown of components(Guasto dei componenti):
Questa prova verrà svolta al termine del processo di testing, essendo una prova potenzialmente distruttiva o che comunque può comportare alterazioni della scheda.
La prova consiste nell'alterazione attraverso cortocircuiti o apertura dei circuiti in punti strategici della scheda quali possono essere pin di circuiti integrati e diodi o comunque piste in generale.

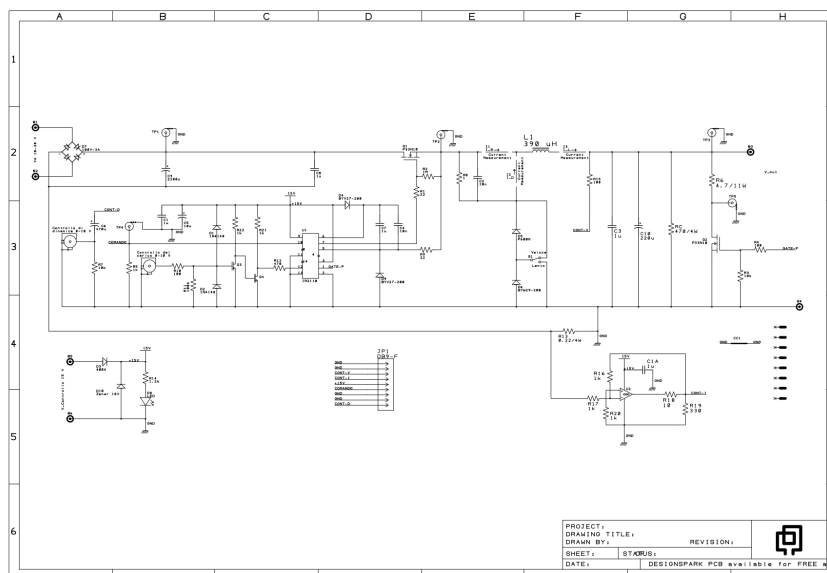


Figura 4.5: Datasheet buck

Un punto nel quale creare un cortocircuito è tra i pin 9-10 , 3-4 del integrato U1, per creare un circuito aperto è sul pin 11 di U1

- Temperature rise :

Per la prova si applicano alla scheda delle termocoppie nei punti più opportuni per l'acquisizione delle temperature, si alimenta la scheda, il test viene svolto a temperatura ambiente (25°C) e la dura fino al momento in cui viene raggiunta la stabilità termica, questo punto viene identificato in 3 letture successive distanti almeno 10 minuti l'una dall'altra in cui la temperatura varia entro 1°C.

I punti scelti per l'acquisizione della temperatura sono i condensatori C6,9,10, l'induttore L1 le resistenze RC,R6 , sui mosfet, sui diodi e lungo le piste dove viene trasmessa potenza.

- Dry heat :

Per la prova dry heat come per il temperature rise si ha l'applicazione delle termocoppie, i punti di applicazione sono i medesimi per entrambe (la scheda ha un layout semplice ed un ridotto numero di componenti quindi i punti di applicazione corrispondono nelle due prove). Durante la prova la scheda verrà inserita in una camera climatica ad una temperatura di 40°C (nel nostro caso essendo una scheda custom che opera nei laboratori dove difficilmente si raggiungono temperature ambiente elevate, osserviamo il limite dei 40°) e resterà alimentata per circa 16 ore nelle quali verranno acquisite le temperature di esercizio dei vari componenti.

- Damp heat :

Per la prova damp heat la scheda non sarà alimentata e le termocoppie rimosse, la scheda verrà posta in camera climatica impostata a 40°C e ad un valore di umidità pari al 93% per un periodo di 4 giorni, a fine prova la scheda va lasciata per 1 ora ad una temperatura compresa tra 15°-35°C e con un umidità compresa tra 25-75% , vanno rimossi attraverso soffiaggio d'aria eventuali resti superficiali d'umidità presenti, una volta eseguiti tutti i passaggi si alimenta la scheda osservando se sono insorti dei guasti.

4.2.1.1 esiti delle prove

- Cortocircuito :

La prova di cortocircuito come risultato ha portato al guasto della scheda, essendo una scheda custom utilizzata in laboratorio ed avendo un utilizzo particolare non sono stati previsti circuiti di protezione da cortocircuito in output(ad esempio un diodo che interdica l'uscita come nel caso di amplificatori) o fusibili di protezione.

- Breakdown of components(Guasto dei componenti) :

Le prove di cortocircuito tra i pin 9-10, 3-4 hanno causato la rottura del componente, in entrambi i casi la scheda ha smesso di funzionare. La prova di circuito aperto sul pin 11

non ha causato guasti ma ha semplicemente instaurato la possibilità di malfunzionamenti, essendo un pin di shutdown c'è la possibilità che il pin capti delle tensioni di interferenza attivandosi disabilitando gli output. Creando un circuito aperto a valle dell' induttore L1 si osserva l'output stabilizzarsi a circa 0V, il circuito di controllo cercherà di riportare l'uscita al valore impostato alzando il periodo di dutycycle dello switch, ciò comporta l'aumento delle temperature, non sono insorti guasti durante la prova ma è presumibile che il malfunzionamento a lungo termine possa causare danni quali rotture di diodi, mosfet o dell'integrato.

- Temperature rise :

La prova non ha evidenziato criticità nelle temperature di esercizio della scheda, se non per quanto riguarda il diodo lento D5 il quale per la natura dell' applicazione in cui è utilizzato raggiunge temperature elevate che possono portarlo alla rottura se lo si utilizza per più di un decina di secondi.

- Dry heat :

La prova come per il temperature rise non ha evidenziato criticità nelle temperature di esercizio, per quanto evidenziato nella precedente prova non è stato testato il diodo lento ma solo quello veloce.

- Damp heat :

La prova svolta non ha portato all'insorgenza di guasti sulla scheda evidenziando quindi una buona fattura negli isolamenti protettivi dei vari componenti.

4.3 strumenti utilizzati per le prove

Gli strumenti che hanno permesso lo svolgimento delle prove sono:

- Camera climatica : usata nello svolgimento di dry e damp heat



Figura 4.6: Esempio di camera climatica

- Saldatore a stagno per il breakdown of components test
- calibro e microscopio per la verifica delle distanze tra le varie piste
- termocoppie e acquirettore di segnali :utilizzati per l'analisi delle temperature durante dry heat e temperature rise



(a) Fronte



HP 34970A (Back Panel)

(b) Retro



(c) Multiplexer a 20 canali

Figura 4.7: Acquisitore di segnali

4.4 considerazioni finali

Conclusioni basate sugli esiti dei test condotti sulla scheda buck in conformità alla norma IEC 61800:

1. Cortocircuito: Durante la prova di cortocircuito, è stato osservato un guasto della scheda poiché non erano presenti circuiti di protezione da cortocircuito in output. Questo risultato

sottolinea l'importanza di implementare adeguati dispositivi di protezione, come diodi o fusibili, per prevenire danni alla scheda in caso di cortocircuito. Inoltre, l'assenza di tali dispositivi può compromettere la sicurezza e l'affidabilità del sistema elettronico.

2. Guasto dei componenti: Le prove di cortocircuito hanno evidenziato la vulnerabilità della scheda ai danni ai componenti. In particolare, la rottura dei componenti dopo i test di cortocircuito indica la necessità di una progettazione più robusta e di un'analisi approfondita dei componenti critici per garantire la resistenza ai guasti durante condizioni estreme. Inoltre, il rischio di malfunzionamenti a lungo termine a seguito di interruzioni nel circuito aperto evidenzia la necessità di considerare attentamente gli effetti a lungo termine delle condizioni operative sulla durata e l'affidabilità della scheda.
3. Temperatura: Nonostante le prove non abbiano evidenziato criticità nelle temperature operative della maggior parte dei componenti, la tendenza del diodo lento D5 a raggiungere temperature elevate durante un utilizzo prolungato solleva preoccupazioni sulla sua affidabilità e durata. Questo sottolinea l'importanza di una gestione termica adeguata e di un'attenta selezione dei componenti per garantire prestazioni affidabili e durature del sistema.
4. Prove di calore secco e umido: Entrambe le prove hanno dimostrato la buona qualità degli isolamenti protettivi dei vari componenti, poiché non sono stati riscontrati guasti durante o dopo le prove. Questo indica che la scheda è ben protetta contro condizioni di calore secco e umido e suggerisce una buona fattura e qualità costruttiva complessiva.
5. In conclusione, mentre la scheda ha superato con successo alcune prove, come quelle di temperatura e umidità, sono emersi dei punti critici che richiedono attenzione, come la mancanza di dispositivi di protezione da cortocircuito e i potenziali rischi legati alla durata dei componenti in condizioni estreme. Questi risultati sottolineano l'importanza di una progettazione robusta, di un'attenta selezione dei componenti e di una valutazione approfondita delle prestazioni e della durata del sistema elettronico.