

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA  
CAMPUS DI CESENA

DIPARTIMENTO DI  
INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA E DELL'INFORMAZIONE  
"GUGLIELMO MARCONI"

CORSO DI LAUREA IN  
INGEGNERIA ELETTRONICA PER L'ENERGIA E L'INFORMAZIONE

**PROGRAMMAZIONE DI UNO STRUMENTO  
VIRTUALE PER LO STUDIO SPERIMENTALE  
DI AFFIDABILITÀ A LUNGO TERMINE  
DI CIRCUITI E DISPOSITIVI  
DI POTENZA A SEMICONDUITTORE**

Elaborato in  
Laboratorio di Dispositivi e Impianti Fotovoltaici

Relatore:

Prof. MAURO ZANUCCOLI

Presentata da:

MORENA FABOZZI

Correlatore:

Dott. GIUSEPPE CAPASSO

ANNO ACCADEMICO 2020/2021



## Sommario

Negli ultimi anni, il campo dell'elettronica di potenza si sta focalizzando sullo studio di materiali alternativi, come i semiconduttori *wide band-gap*, che consentono migliori prestazioni rispetto al più comune silicio. Tuttavia, allo stato dell'arte non è ancora disponibile una trattazione completa e definitiva riguardo l'affidabilità a lungo termine di tali materiali, fattore chiave per l'elettronica di potenza.

Scopo di questa tesi è fornire un contributo allo studio sperimentale dell'affidabilità a lungo termine di transistori al nitruro di gallio (GaN) attraverso una caratterizzazione in-situ, stressando i dispositivi attraverso un circuito di conversione DC-DC di tipo Buck. In particolare, l'elaborato si concentra sulla realizzazione di un sistema automatico di caratterizzazione, implementato da uno strumento virtuale programmato in *LabVIEW*, in grado di gestire il sistema di acquisizione e di garantire un'accurata sincronizzazione degli strumenti utilizzati per la realizzazione del setup sperimentale.

Il sistema deve eseguire prove in condizioni di degrado accelerato consentendo l'acquisizione sperimentale di caratteristiche DC ai terminali dei transistori dopo determinati periodi di funzionamento da convertitore, garantendo una corretta gestione e monitoraggio delle condizioni di potenziale guasto al fine di permettere lo svolgimento dello studio in sicurezza. Per la validazione dello strumento sono state effettuate delle misure preliminari di efficienza del convertitore e di caratterizzazione dei dispositivi e confrontate con le caratteristiche fornite dai costruttori. Dai risultati ottenuti si può affermare che tale strumento facilita il processo automatico di acquisizione in presenza di un banco di misura di significativa complessità, garantendo ripetibilità ed accuratezza in termini temporali, affidabilità di gestione complessiva e possibilità di monitoraggio di un numero elevato di parametri elettrici.



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1	Caso di studio . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Automatic Test Equipment</b>	<b>9</b>
2.1	Setup di misura . . . . .	9
2.1.1	Monitoraggio . . . . .	11
2.1.2	Caratterizzazione statica . . . . .	12
2.2	Matrice di relè . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Strumento Virtuale</b>	<b>21</b>
3.1	Diagramma di flusso . . . . .	21
3.2	Ambiente di sviluppo . . . . .	25
3.3	Descrizione del software . . . . .	26
3.3.1	Main . . . . .	26
3.3.2	Init . . . . .	32
3.3.3	Startup/Shutdown . . . . .	33
3.3.4	DC-DC Converter . . . . .	38
3.3.5	Caratterizzazione I-V . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Validazione e Risultati</b>	<b>47</b>
4.1	Efficienza e Temperatura . . . . .	48
4.2	Caratterizzazione DC . . . . .	50
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>57</b>



# Capitolo 1

## Introduzione

L'elettronica di potenza si occupa della conversione e del controllo del flusso di energia elettrica, fornendo tensioni e correnti adattabili alle esigenze del carico.

Dalla sua nascita, fatta risalire all'invenzione del raddrizzatore controllato al silicio (SCR, *Silicon Controlled Rectifier*) nel 1956, questo settore è in continua evoluzione. Grazie ai miglioramenti nel campo della microelettronica e ai progressi nella tecnologia di fabbricazione dei componenti di potenza a semiconduttore, sono stati sviluppati molti dispositivi elettronici per soddisfare efficientemente le richieste di mercato, sia in termini di prestazioni in potenza, sia di frequenza di commutazione [1]. Tale sviluppo permette di far fronte alle esigenze di gestione e conversione dell'energia elettrica richieste nei sistemi moderni per l'implementazione di funzioni sempre più complesse. Per tale motivo, oggi l'elettronica di potenza svolge un ruolo centrale nel mercato sempre più vasto dell'energia, essendo presente nella maggior parte delle applicazioni in cui viene impiegata tale forma di energia.

Negli ultimi anni, si può osservare un aumento della richiesta di energia elettrica come conseguenza dello sviluppo tecnologico. Si stima che la domanda mondiale di elettricità è destinata a crescere di quasi il 5% nel 2021 e del 4% nel 2022 [2].

Tra le cause di questa tendenza globale, si possono sottolineare lo sviluppo di moderne tecnologie quali l'Internet of Things (IoT), il processo di modernizzazione e digitalizzazione legata all'industria 4.0 e l'incremento della fabbricazione di auto elettriche. Questo andamento ha portato, nell'ultimo periodo, a concentrarsi su due temi molto urgenti in ambito energetico finalizzati alla

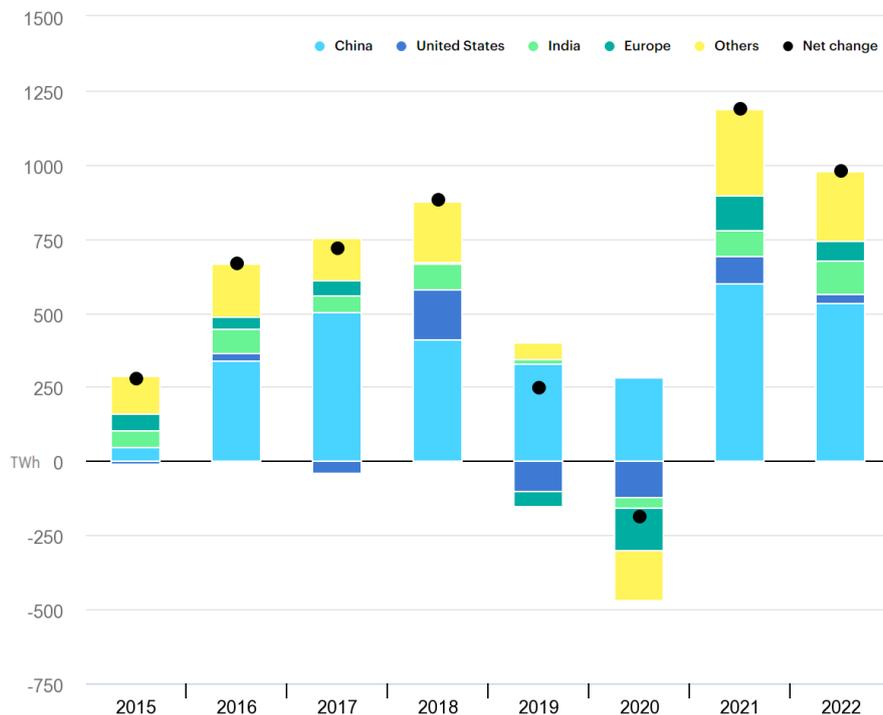


Figura 1.1: Cambiamenti globali nella domanda di elettricit , 2015-2022 [2].

riduzione delle emissioni di  $CO_2$  in atmosfera: lo sviluppo di fonti di energia rinnovabile e l'aumento dell'efficienza di conversione dell'energia [3].

Si possono illustrare brevemente diversi circuiti di potenza che svolgono un ruolo fondamentale negli ambiti sopracitati:

- Convertitore: termine generale per definire un circuito elettronico di potenza, costituito da dispositivi di potenza a semiconduttore con la funzione di interruttori, impiegato per la gestione e la conversione dell'energia elettrica. I convertitori possono essere classificati in quattro categorie secondo il tipo di potenza di ingresso e di uscita, ognuna con le proprie applicazioni, se ne citano alcune come esempio: convertitori DC-DC, utilizzati per l'isolamento elettronico, per la correzione del fattore di potenza, per mantenere la tensione d'uscita fissa a un certo livello; convertitori AC-DC, utilizzati per il trasferimento di energia quando un dispositivo elettronico   collegato alla rete elettrica; convertitori AC-AC, utilizzati per modificare sia il livello di tensione sia la frequenza nelle reti di distribuzione della potenza.

- 
- Inverter: un convertitore DC-AC che trasferisce potenza da una sorgente DC ad un carico alimentato in AC, controllando l'ampiezza, la frequenza e il tipo di forma d'onda in uscita. In base al tipo di sorgente (di tensione o di corrente), si classificano rispettivamente in invertitori di tensione, o a tensione impressa, e invertitori di corrente, o a corrente impressa. Gli invertitori hanno molteplici applicazioni, molte delle quali inerenti ai temi affrontati precedentemente. Vengono, infatti, utilizzati nella trasmissione di energia elettrica - convertendo l'energia in DC trasferita negli elettrodotti per essere immessa nella rete in AC -, nei motori elettrici per la variazione di velocità, nell'utilizzo di pannelli fotovoltaici - trasformando la tensione continua ricavata in tensione alternata da utilizzare per uso domestico o da immettere sulla rete di distribuzione - o per altri impianti di produzione di energia da fonti rinnovabili.
  - Azionamento elettrico: un sistema che produce, in maniera automatica, il moto desiderato di un carico meccanico attraverso la conversione di energia da elettrica (ingresso) a meccanica (uscita). Ogni azionamento elettrico è composto da un motore elettrico, un convertitore statico e un dispositivo di controllo. In generale, il movimento desiderato viene comunicato al circuito di controllo in modo da essere confrontato - tramite un ramo di retroazione - con l'informazione restituita dal motore elettrico. Se i due segnali differiscono, il controllore elabora un'adeguata azione di controllo tale da ottenere il comportamento desiderato. Il convertitore riceve in ingresso il segnale di controllo ed alimenta opportunamente il motore elettrico. Questo tipo di dispositivo può essere utilizzato in diversi campi, quali i trasporti (aerei, automobili elettriche ed ibride, navi, treni, ecc.), la robotica, i macchinari industriali ma anche macchine comuni ad uso domestico quali gli elettrodomestici.

Conseguentemente risulta fondamentale la ricerca e lo sviluppo di nuove tecnologie o topologie dei circuiti elettronici di potenza illustrati tali da ottenere una maggiore efficienza e affidabilità. A tal proposito, si ritiene particolarmente importante, date le richieste del mercato, sviluppare convertitori di potenza DC-DC (corrente continua) avanzati di minimo ingombro e peso contraddistinti da elevata efficienza, velocità di commutazione e densità di potenza. Da una parte il silicio - storicamente più utilizzato per la realizzazione

di dispositivi a semiconduttore per applicazioni di potenza - è un materiale le cui proprietà di affidabilità a lungo termine sono note, dall'altra i dispositivi realizzati con semiconduttori *wide band-gap* (es. Nitruro di Gallio GaN, Carburo di Silicio SiC) offrono prestazioni estremamente interessanti rispetto al silicio, ma dal punto di vista dell'affidabilità a lungo termine - fattore fondamentale per l'elettronica di potenza e per la penetrazione nel mercato degli stessi dispositivi - ad oggi è presente un'oggettiva carenza di informazioni.

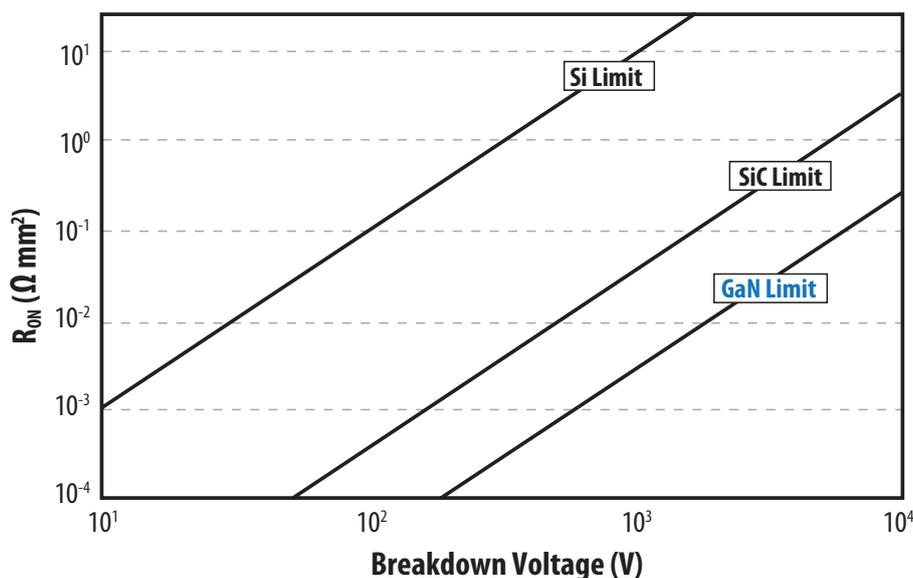


Figura 1.2: Resistenza  $R_{ON}$  teorica in funzione della tensione di breakdown per GaN, Si e SiC [4].

I dispositivi al SiC e al GaN sono caratterizzati da un *band-gap* più ampio di energia tra la banda di valenza e la banda di conduzione che permette loro di lavorare anche a temperature maggiori senza avere danneggiamenti. Con alti valori di campi critici di breakdown, alta frequenza di commutazione, alta conducibilità termica e resistenza di valore relativamente più basso rispetto a MOSFET di potenza in silicio, questi dispositivi riescono a sostenere tensioni più elevate e maggiore densità di potenza elettrica con dimensioni ridotte rispetto a quelli basati sul silicio (vedi Figura 1.2 e Tabella 1.1). Dati i vantaggi di queste nuove tecnologie, assume un ruolo fondamentale lo studio di affidabilità nel momento in cui questi dispositivi iniziano a fare la comparsa o comunque si prevede di utilizzarli nell'ambito dei circuiti di potenza. Questo elaborato si concentrerà, a meno di una breve introduzione sul dispositivo di

Tabella 1.1: Confronto caratteristiche GaN, Si e SiC [4]

Proprietà	GaN	Si	SiC
Band Gap $E_G$ (eV)	3.4	1.12	3.2
Campo Elettrico Critico $E_{BR}$ (MV cm <sup>-1</sup> )	3.3	0.3	3.5
Velocità di Saturazione $V_{SAT}$ ( $1 \times 10^7$ cm s <sup>-1</sup> )	2.5	1.0	2.0
Mobilità Elettronica $\mu$ (cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	2000	1500	650
Conducibilità Termica $k$ (W cm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )	1.5	4.5	1.3

interesse, sullo studio sperimentale di affidabilità a lungo termine di tali dispositivi e, in particolare, sull'automatizzazione del banco di misura utilizzato per la caratterizzazione.

## 1.1 Caso di studio

Il circuito elettronico di potenza individuato, tra le applicazioni più comuni del mercato in particolare in ambito automotive, è un convertitore DC-DC di tipo buck sincrono con le seguenti caratteristiche: tensione di ingresso di 48 V, tensione di uscita di 12 V, potenza di uscita di 50 W - 100 W e frequenza di commutazione di 100 kHz - 1 MHz. Tale applicazione, in ambito automotive, permette un'elettificazione del veicolo in modo efficiente, riducendo l'ingombro e il peso dei cablaggi.

In generale, i convertitori DC-DC a commutazione sono impiegati per trasformare la tensione continua d'ingresso in una tensione continua d'uscita regolata al livello desiderato, più basso del livello in ingresso per il tipo buck. Il circuito impiega due transistori, opportunamente comandati da un segnale modulato tramite larghezza di impulso (PWM, *Pulse Width Modulation*), in modo da passare ciclicamente da uno stato off a uno stato on a bassissima resistenza.

Uno degli aspetti critici del circuito, tralasciando le induttanze parassite e tutte le altre problematiche di progettazione del layout in quanto non oggetto di questo elaborato, riguarda il comportamento dei transistori di potenza. Lo scopo del progetto, da cui discende quest'attività di tesi, mira allo studio di affidabilità di dispositivi di potenza realizzati con materiali semiconduttori innovativi. In questo caso di studio, i dispositivi di interesse sono dispositivi

commerciali al nitruro di gallio (GaN) ad alta mobilità elettronica (HEMT, *High Electron Mobility Transistor*).

I dispositivi GaN sono soggetti in questa tipologia di circuito a diverse sollecitazioni le quali causano un graduale degrado delle prestazioni elettriche di questi componenti fino alla rottura. I transistori di potenza utilizzati in queste applicazioni, infatti, lavorano in condizioni particolarmente stressanti, con velocità di commutazione elevate e sottoposti a continue variazioni di tensione e di corrente tra uno stato e l'altro.

Sono stati condotti numerosi studi sulla caratterizzazione dell'affidabilità di questi dispositivi nei quali sono state simulate possibili situazioni di stress termico ed elettrico attraverso la caratterizzazione dei singoli dispositivi ancora su wafer (quindi senza package ed isolati da qualunque rete elettrica). Sono esempi i lavori [5, 6] in cui i singoli dispositivi sono stati stimolati con segnali elettrici (esempio impulsi controllati sul gate a determinate tensioni di off) condotti in condizioni di stress accelerato (temperatura relativamente più alta di quella ambiente per favorire la formazione di stati trappola e difetti nei materiali). Si ritiene che, nonostante le tecniche utilizzate siano innovative e avanzate, questa trattazione possa essere potenzialmente limitante in quanto il funzionamento in un circuito di potenza reale può portare, in alcuni casi, a fenomeni imprevisti che, invece, devono essere considerati.

A tal proposito, si è deciso di procedere con una caratterizzazione in-situ, ovvero una misura delle grandezze d'interesse - e il loro relativo degrado - quando i dispositivi d'interesse sono collocati e operano all'interno di un circuito reale. In tal caso i dispositivi sono infatti soggetti a  $di/dt$ , tensioni di off ed intensità di correnti tipiche dei circuiti reali - in particolar modo nel caso dei circuiti di tipo hard-switching come il buck converter - che difficilmente potrebbero essere riprodotte nel caso di caratterizzazione con singolo dispositivo isolato su probe station. Questa metodologia permette di valutare l'affidabilità a lungo termine in maniera più accurata, testando il comportamento dei dispositivi di potenza in condizioni operative reali e ottenendo maggiori informazioni relativamente ai fenomeni che possano incidere sul loro tempo di vita.

Dopo aver inquadrato l'ambito e il circuito a semiconduttore di potenza, si prosegue verso lo studio di affidabilità tramite la caratterizzazione speri-

mentale sopra descritta. In particolare, l'obiettivo di questa tesi è quello di sviluppare uno strumento virtuale mediante *LabVIEW* per implementare un banco automatico di misura in grado di acquisire le caratteristiche elettriche I-V di transistori di potenza e monitorare, durante il funzionamento da convertitore, tutte le grandezze tipiche di questa tipologia di circuito: efficienza, tensioni, correnti e temperature d'interesse. Infatti, negli studi di affidabilità con condizioni di degrado accelerato in laboratorio, è fondamentale eseguire prove ripetute nel tempo a cadenze temporali ben precise e rispettando determinate sequenze di attivazione dei vari segnali elettrici. Solo un banco automatico di misura - in luogo con un operatore umano - è in grado di gestire in modo efficace e rigoroso tutto il processo di acquisizione e caratterizzazione. Nel capitolo 2 si illustra il sistema di collaudo automatico (ATE, *Automatic Test Equipment*), ovvero tutti quei sistemi e strumenti - nonché il cablaggio - utilizzati nel setup sperimentale di misura per collaudare il circuito. Nel capitolo 3 si descrive lo strumento virtuale, partendo dall'algoritmo che delinea le varie fasi di lavoro. Nel capitolo 4 si presentano e si discutono i risultati ottenuti dallo strumento virtuale. L'elaborato si conclude con le conclusioni.



## Capitolo 2

# Automatic Test Equipment

In questo capitolo viene discusso il progetto del sistema di misura che si occupa del monitoraggio delle figure di merito del convertitore e dell'acquisizione delle caratteristiche ai terminali dei transistori di potenza. Il setup di misura deve includere un blocco che permetta di cambiare la modalità di funzionamento del circuito, ovvero avere la possibilità di passare da una fase di operatività (modalità convertitore di potenza) ad una fase di caratterizzazione dei componenti analizzati, isolandoli dalla rete principale per il solo tempo necessario alla caratterizzazione. In generale è preferibile non interrompere la fase operativa per un tempo più lungo di quello necessario onde evitare il recupero di difetti a breve termine, cioè dovuti a trappole elettroniche nei materiali che hanno tempi di rilassamento relativamente brevi, fermo restando - per completezza e chiarezza - che lo studio di affidabilità ha come obiettivo in realtà lo studio del degrado a lungo termine (tempi di recupero importanti) o non più recuperabile.

Nel seguito viene pertanto descritto il banco di misura completo, gli strumenti utilizzati e la matrice di relé che si occupa della commutazione tra una fase di lavoro ed un'altra.

### 2.1 Setup di misura

L'apparato sperimentale allestito in laboratorio è mostrato schematicamente in Figura 2.1. In seguito si descriveranno inizialmente i blocchi principali e indispensabili per il test: il circuito da analizzare, l'alimentatore, il carico

elettronico e il generatore di forme d'onda. Si illustreranno nella fase successiva successivamente gli strumenti che permettono di effettuare i due diversi tipi di misura: i multimetri per il monitoraggio di tensioni e correnti e le *Source Measure Unit* (SMU) per la caratterizzazione dei transistori.

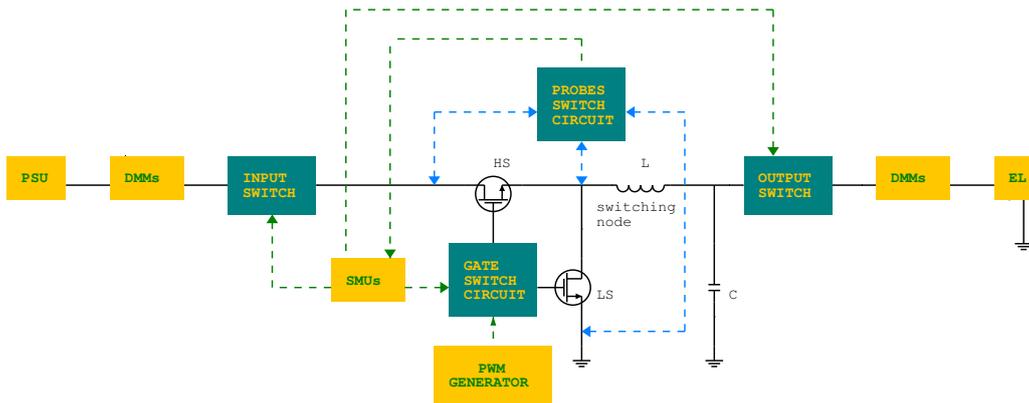


Figura 2.1: Schema a blocchi del setup di misura.

Il convertitore buck sincrono viene rappresentato sinteticamente da un blocco composto da due transistor GaN (High Side, Low Side) usati come interruttori, un induttore  $L$  ed un condensatore  $C$  impiegati come filtro di uscita.

Lo strumento utilizzato per l'alimentazione è l'*ITECH IT6516C*, una *Power Supply Unit* (PSU) da 1800 W, in grado di erogare in uscita una corrente e una tensione massima rispettivamente di 15 A e 750 V [7]. L'alimentatore viene configurato in modo da lavorare in modalità tensione costante (CV, *Constant Voltage*) imponendo una tensione di 48 V in ingresso al circuito. Possono essere abilitati e impostati ulteriori limiti interni, tramite i sistemi di protezione da sovratensione (OVP, *Over Voltage Protection*) e sovracorrente (OCP, *Over Current Protection*), per salvaguardare la sicurezza del circuito a valle.

Come carico elettronico è stato utilizzato l'*ITECH IT8902E* che presenta una potenza da 2000 W e un'ampia gamma di valori di tensione e corrente rispettivamente di 150 V e 200 A [8]. Il dispositivo si comporta come una resistenza di carico, applicata a valle del convertitore, che permette di impostare la corrente desiderata. Si procede poi con la configurazione: viene selezionata la modalità corrente costante (CC, *Constant Current*); si impostano i parametri base, se necessario (gamma di valori, valore massimo e minimo

di tensione); viene abilitato e impostato l'OCP e, infine, settato il valore di corrente desiderato.

Il generatore di funzioni scelto è il *FLUKE PM5139*, strumento in grado di generare segnali di diversa forma, andando ad agire su alcuni parametri quali la frequenza, il duty-cycle, l'ampiezza, ecc. [9] Viene utilizzato per creare la forma d'onda che comanda i driver dei gate dei due transistori. Il segnale desiderato è un'onda quadra con dinamica  $[0, 5] \text{ V}$  che permette l'accensione del GaN high side e lo spegnimento del GaN low side durante il periodo di tempo in cui il segnale è uguale a  $5 \text{ V}$ , detto  $T_{ON}$ , e il contrario nel restante periodo di tempo  $T - T_{ON}$ , detto  $T_{OFF}$ . Si prende un duty-cycle del 25% in modo da avere, dato un convertitore che funziona in modo continuo, la tensione di uscita pari a quella desiderata:

$$V_{OUT} = V_{IN} \cdot D = 12 \text{ V}$$

### 2.1.1 Monitoraggio

In Figura 2.2 vengono evidenziate le interconnessioni dei quattro multimetri nella configurazione sia di amperometro che di voltmetro.

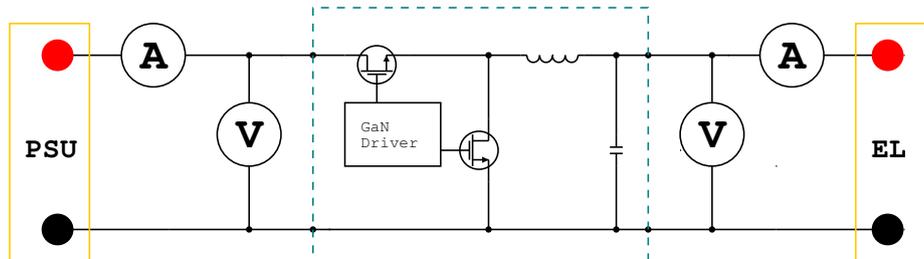


Figura 2.2: Schema di collegamento dei DMM.

È stato scelto il *FLUKE 45*, un *Digital MultiMeter* (DMM) a 5 cifre con due display, dei quali se ne utilizza solo uno [10]. Dopo essere stato opportunamente configurato impostando la gamma di valori (*range*) e tasso di letture (*rate*), si seleziona il tipo di misura e si attiva la lettura. Per questa attività devono essere effettuate delle misure DC di tensione e di corrente. I DMM misurano la tensione e la corrente d'ingresso e di uscita e, di conseguenza, monitorano l'efficienza lungo il tempo di funzionamento in modalità convertitore.

In seguito, si può effettuare un ulteriore controllo sulle correnti, valutando se superano una certa soglia critica che potrebbe portare a dei danneggiamenti.

La temperatura è, invece, monitorata in modo indiretto attraverso il termistore *TDK NTCG103JX103DT1S* posizionato nel circuito tra i due transistori [11]. Un termistore è un resistore il cui valore di resistenza dipende dalla temperatura, in particolare - per la tipologia NTC - decresce con l'aumentare della temperatura secondo la seguente equazione:

$$T_2 = \frac{B}{B/T_1 + \ln(R_2/R_1)} \quad (2.1)$$

dove le temperature sono in kelvin,  $R_1$  è la resistenza alla temperatura  $T_1$  (misurate prima di effettuare la prova di caratterizzazione) e  $B$  è un parametro specifico per ogni modello. È possibile, in questo modo, tramite una misura di resistenza  $R_2$  stimare la temperatura  $T_2$  e, di conseguenza, attraverso un modello elettrico equivalente del sistema termico stimare la temperatura di giunzione dei transistori.

Lo strumento scelto è il *KEITHLEY 2601*, una *Source Measure Unit* a un canale [12]. La SMU viene configurata in modo da effettuare una misura di resistenza a quattro fili, garantendo una precisione maggiore dato il piccolo valore di resistenza che si può rilevare ad elevate temperature.

### 2.1.2 Caratterizzazione statica

La caratterizzazione DC consente di ottenere le caratteristiche statiche I-V dei transistori di potenza in esame e di valutarne lo stato di vita attraverso l'estrazione dei suoi parametri tipici (corrente di drain, corrente di perdita attraverso il gate, tensione di soglia, ecc.). Viene effettuata utilizzando il sistema schematizzato in Figura 2.3, di seguito descritto.

Lo strumento utilizzato è il *KEITHLEY 2612B*, una *Source Measure Unit* a due canali in grado di acquisire automaticamente le caratteristiche corrente-tensione del dispositivo da analizzare. La SMU, a differenza del DMM, è uno strumento in grado di ottenere famiglie di curve I-V, riuscendo a combinare la funzione di generazione con quella di misura in un singolo canale. Nello specifico, può simultaneamente impostare un segnale di tensione (corrente) e valutarne l'effetto leggendo il corrispondente segnale di corrente (tensione).

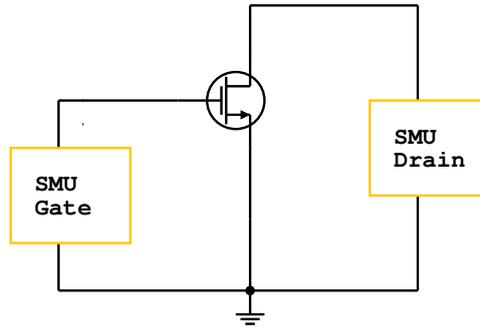


Figura 2.3: Schema di collegamento delle SMU per caratteristica I-V.

È facile immaginare che al gate sarà collegata una SMU per generare (*force*) la tensione  $V_{GS}$  e misurare (*sense*) la corrente  $I_G$ , mentre al drain sarà collegata un'altra SMU (o un altro canale) per generare la tensione  $V_{DS}$  e misurare la corrente  $I_D$ . Da sottolineare la tecnica di misurazione: per il drain, dato il valore di  $R_D^{ON}$  del transistor (dal datasheet:  $R_D^{ON} = 13.5 \text{ m}\Omega$  (MAX),  $V_{DS} = 100 \text{ V}$  valutata per  $V_{GS} = 5 \text{ V}$ ,  $I_D = 11 \text{ A}$ ), occorre una misura a quattro fili per evitare che le resistenze di linea e di connessione perturbino la misurazione; per il gate viene usata una semplice misura a due fili in quanto la corrente - in assenza di perdite - ha un valore molto basso, non rendendo significative le possibili cadute di tensione dovute alle piste.

Grazie alla matrice di relè, che commuta opportunamente le piste di collegamento del circuito, la SMU a disposizione viene utilizzata per entrambi i transistori (HS, LS) e i suoi due canali sono collegati nel seguente modo: il canale A al gate e il canale B al drain. Con tale configurazione si ottengono quattro caratteristiche, due per transistor:

- $I_D$ - $V_{GS}$  a  $V_{DS}$  fissata, per valutare il corretto funzionamento del dispositivo;
- $I_G$ - $V_{GS}$  a  $V_{DS}$  fissata, per monitorare una possibile rottura, contrassegnata da un alto valore di corrente di perdita del gate.

La SMU è connessa al circuito tramite dei cavi triax, garantendo una maggiore protezione dalle interferenze. Sul pannello posteriore viene collegato un connettore triax (compatibile con il modello scelto) su cui insistono i tre cavi attraverso cui circola il segnale. Sulla scheda, che presenta dei terminali

coassiali, sono presenti dei connettori BNC per effettuare la conversione da triassiale a coassiale. I segnali che viaggiano nella scheda sono, quindi, quello dell'anima e della calza esterna e convergono in specifici punti per poter effettuare la misura a quattro fili. In Figura 2.4 sono specificati i segnali che circolano nei tre strati dei tre cavi.

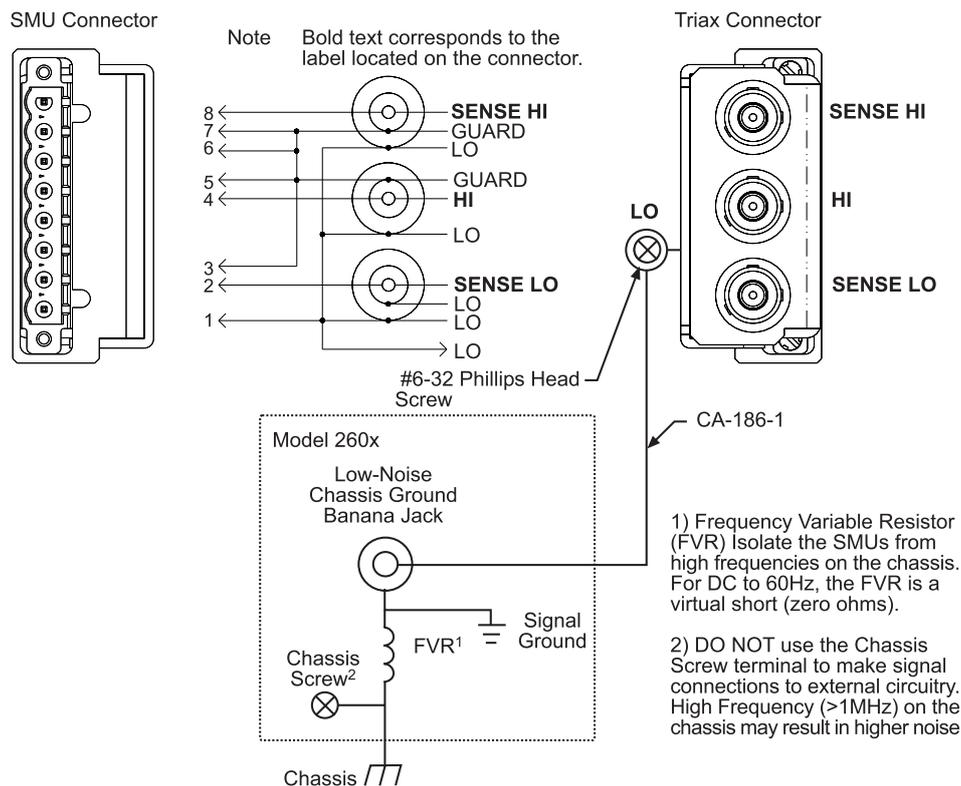


Figura 2.4: Schematico connettore triax SMU [13].

Tutte le apparecchiature di laboratorio appena descritte possono essere regolate sia manualmente che in remoto tramite LabVIEW driver. Dati i nostri obiettivi viene scelta la seconda opzione. Gli strumenti possono, quindi, essere connessi tramite un cavo GP-IB ad un PC dove uno strumento virtuale, programmato in LabVIEW, è in grado di pilotarli. Lo standard IEEE-488 permette ai dispositivi (massimo quindici, nell'attività ne vengono usati nove) di condividere un singolo bus, associando a ciascuno di essi un indirizzo univoco. Con questa soluzione possono essere collegati strumenti diversi utilizzando un

unico protocollo, ovvero stesse specifiche elettriche, meccaniche e funzionali. L'implementazione viene descritta in dettaglio nel capitolo 3.

## 2.2 Matrice di relè

La matrice di switching è composta da relè a due stati SPST (*Single Pole Single Throw*, cioè singolo polo e singolo contatto), SPDT (*Single Pole Double Throw*, cioè singolo polo e doppio contatto) e DPST (*Double Pole Single Throw*, cioè doppio polo e singolo contatto). I relè sono componenti elettromeccanici che permettono sia il passaggio da uno stato all'altro, sia l'isolamento galvanico tra i segnali, salvaguardando il sistema di misura da eventuali danni che si potrebbero avere senza il disaccoppiamento tra ingresso e uscita. Come già affermato, sono stati utilizzati tre tipi di relè che si comportano rispettivamente come interruttore on-off, deviatore tra due piste e doppio interruttore controllato da un singolo meccanismo. Tutti i relè vengono pilotati dalla porta DIGITAL I/O della SMU utilizzata per la misura di resistenza attraverso un comando di scrittura sull'uscita digitale TTL - eseguibile anche tramite LabVIEW - in modo da configurare le interconnessioni del circuito nelle quattro modalità di funzionamento desiderate: off, convertitore buck on, caratterizzazione transistor HS e caratterizzazione transistor LS. Lo schema utilizzato è mostrato in Figura 2.5.

La matrice è stata costruita facendo le seguenti considerazioni. Per la caratterizzazione dei transistori occorre inizialmente un isolamento del convertitore dalla rete a valle e a monte, pertanto sono stati integrati degli interruttori in ingresso e uscita (R17, R16). Successivamente, è necessario interrompere le piste di connessione al circuito dei relativi terminali di gate, source e drain, collegandole ai terminali della SMU per la misura. A tal fine, sono stati inseriti altri dodici relè. In aggiunta, si è osservato sperimentalmente che il filtro d'uscita e il gruppo di sei condensatori d'ingresso alterano in maniera significativa la misura durante la fase di caratterizzazione. I condensatori possono essere divisi in due raggruppamenti da tre: il primo con capacità circa di 100 nF vicino al transistor e il secondo con capacità circa di 4.7  $\mu$ F vicino alla rete, quello che interferisce maggiormente dato il valore di capacità più elevato a causa delle relativamente più alte correnti di perdita (*leakage*). Questa scel-



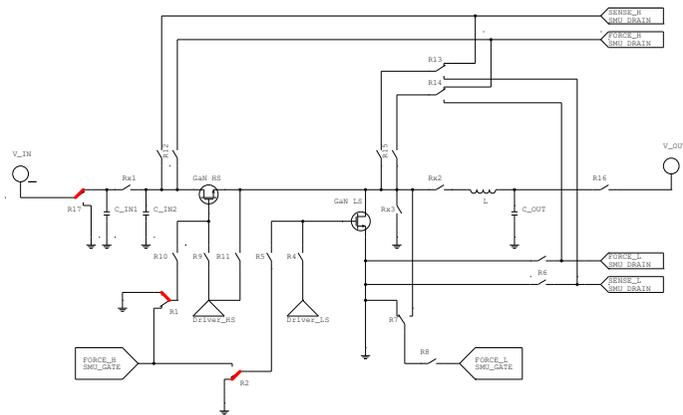
mercato non compromettendo il tipo di studio da effettuare.

Una nota riguardo le scelte di progetto: i relè - eccetto quelli in serie ai percorsi più critici per i quali occorre prevedere la minimizzazione di induttanza parassita (segnale di source del transistor high side, segnali di gate) - sono posizionati nella scheda esterna al circuito da testare. Infatti lo studio di affidabilità deve essere svolto in condizioni di stress accelerato come può essere l'aumento della temperatura di esercizio del convertitore grazie all'ausilio, ad esempio, di un forno. Questo pone seri problemi nell'individuazione di relè che riescono a sopportare tali temperature. Pertanto, tutto ciò che non è indispensabile da posizionare in vicinanza della parte di potenza è stato spostato in una scheda esterna che opera a temperatura ambiente.

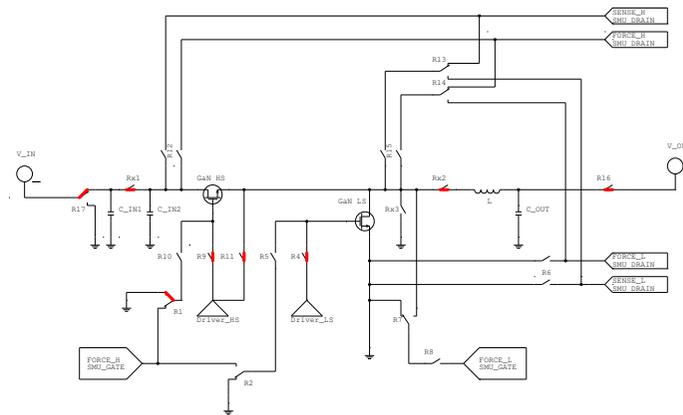
Vengono di seguito descritte le configurazioni degli interruttori per i quattro tipi di funzionamento:

- Off, in Figura 2.6a:
  - apertura di tutti gli interruttori a singolo contatto (Rx1, Rx2, R4, R5, R6, R8, R9, R10, R11, R12, R15, R16);
  - chiusura di R1 e R2 verso massa per disalimentare il circuito;
  - commutazione di R17 verso il drain del transistor high side;
- Convertitore buck on, in Figura 2.6b:
  - chiusura degli interruttori Rx1, Rx2, R4, R9, R11, R16 e R17 verso il drain del transistor high side per collegare il convertitore alla rete, sia in ingresso che in uscita e per connettere il gate dei transistori ai rispettivi driver;
  - apertura di tutti gli altri interruttori a singolo contatto e commutazione di R1 verso massa per evitare qualsiasi influenza della SMU;
- Caratterizzazione del transistor high side, in Figura 2.6c:
  - apertura degli interruttori Rx1, Rx2, R4, R9, R11, R16 e R17 commutato verso massa, situazione opposta al caso precedente, per isolare il circuito dalla rete e dai segnali di pilotaggio esterni;

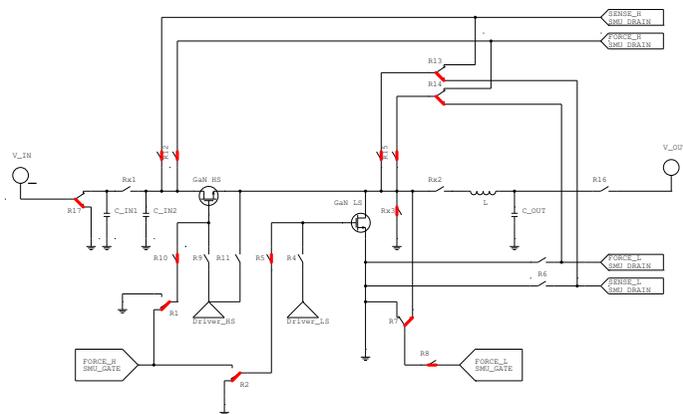
- chiusura di R12 per connettere i pin FORCE\_H e SENSE\_H e chiusura di R15 e commutazione di R13 e R14 verso i pin FORCE\_L e SENSE\_L per collegare i terminali dell'SMU rispettivamente al drain e al source del GaN HS in modo da effettuare la misura a quattro fili;
  - chiusura di R10 e R8 e commutazione R1 e R7 verso i connettori dell'SMU per collegare lo strumento al gate e al source del GaN HS per la misura a due fili;
  - apertura di R6 e chiusura di R5 e di R2 verso massa per garantire, attraverso l'indirizzamento del proprio gate verso GND, lo stato di spegnimento del GaN LS, che non deve interferire;
- Caratterizzazione del transistor low side, in Figura 2.6d:
    - apertura degli interruttori Rx1, Rx2, R4, R9, R11, R16 e R17 commutato verso massa per le stesse considerazioni fatte nel caso precedente;
    - chiusura di R15 e commutazione di R13 e R14 verso i pin FORCE\_H e SENSE\_H e chiusura di R6 per connettere i pin FORCE\_L e SENSE\_L per collegare, in questo caso, i terminali dell'SMU rispettivamente al drain e al source del GaN LS in modo da effettuare la misura a quattro fili;
    - chiusura di R5 e R8 e commutazione di R2 e R7 verso i connettori dell'SMU per collegare lo strumento al gate e al source del GaN LS per la misura a due fili;
    - apertura di R12 e chiusura di R10 e di R1 verso massa per garantire, attraverso l'indirizzamento del proprio gate verso GND, lo stato di spegnimento del GaN HS.



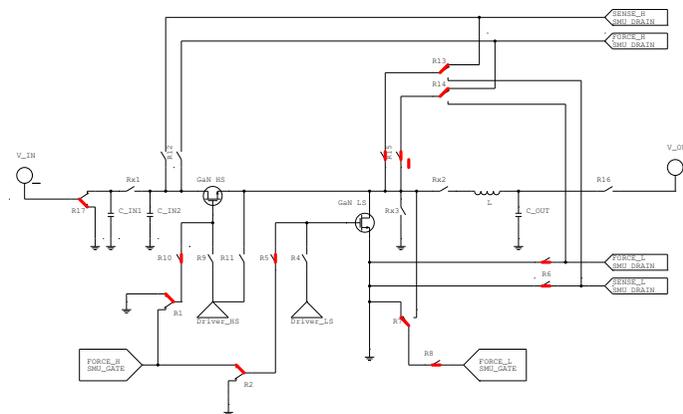
(a) Off



(b) Convertitore buck on



(c) Caratterizzazione del transistor high side



(d) Caratterizzazione del transistor low side

Figura 2.6: Configurazioni della matrice di relè.

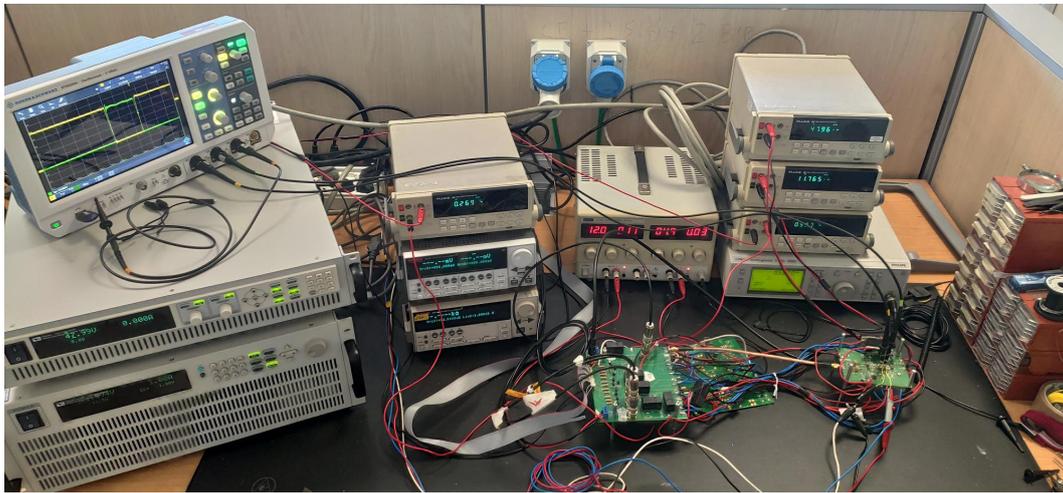


Figura 2.7: Apparato sperimentale allestito in laboratorio.

# Capitolo 3

## Strumento Virtuale

### 3.1 Diagramma di flusso

Prima di descrivere lo strumento virtuale è utile rappresentare l'algoritmo mediante un diagramma di flusso, mostrato in Figura 3.1 nella pagina seguente. Lo schema presenta tutti i passaggi da seguire per compiere una corretta caratterizzazione in-situ dei dispositivi al GaN d'interesse. La descrizione dell'algoritmo viene suddivisa in due fasi: una prima parte contenente una descrizione più generale del procedimento scelto e una seconda parte riguardante una descrizione più dettagliata dei blocchi.

Si consideri preliminarmente il circuito in modalità di funzionamento "off", scollegato sia dall'alimentatore che dal carico. Dopo una prima parte di inizializzazione degli strumenti, si passa allo stato on e, prima di applicare le tensioni e le correnti desiderate, si impone una tensione d'ingresso e d'uscita nulla per scaricare le capacità d'ingresso e d'uscita del circuito. Successivamente, si avvia il convertitore attraverso uno *soft start*, ossia un avviamento graduale: si applica una rampa di corrente - al carico - e di tensione - all'alimentatore - in modo da evitare eventuali condizioni stressanti, come picchi di corrente all'avvio, che si possono verificare in caso di applicazioni di un gradino da zero al valore finale. Arrivato al punto di lavoro desiderato, lo strumento inizia il monitoraggio delle figure di merito. A meno di potenziali problemi - come il rilevamento del superamento delle soglie critiche delle correnti e dell'efficienza - che portano ad uno spegnimento di emergenza, si prosegue, per determinati istanti di tempo scelti dall'utente, verso la fase di caratterizzazione dei due

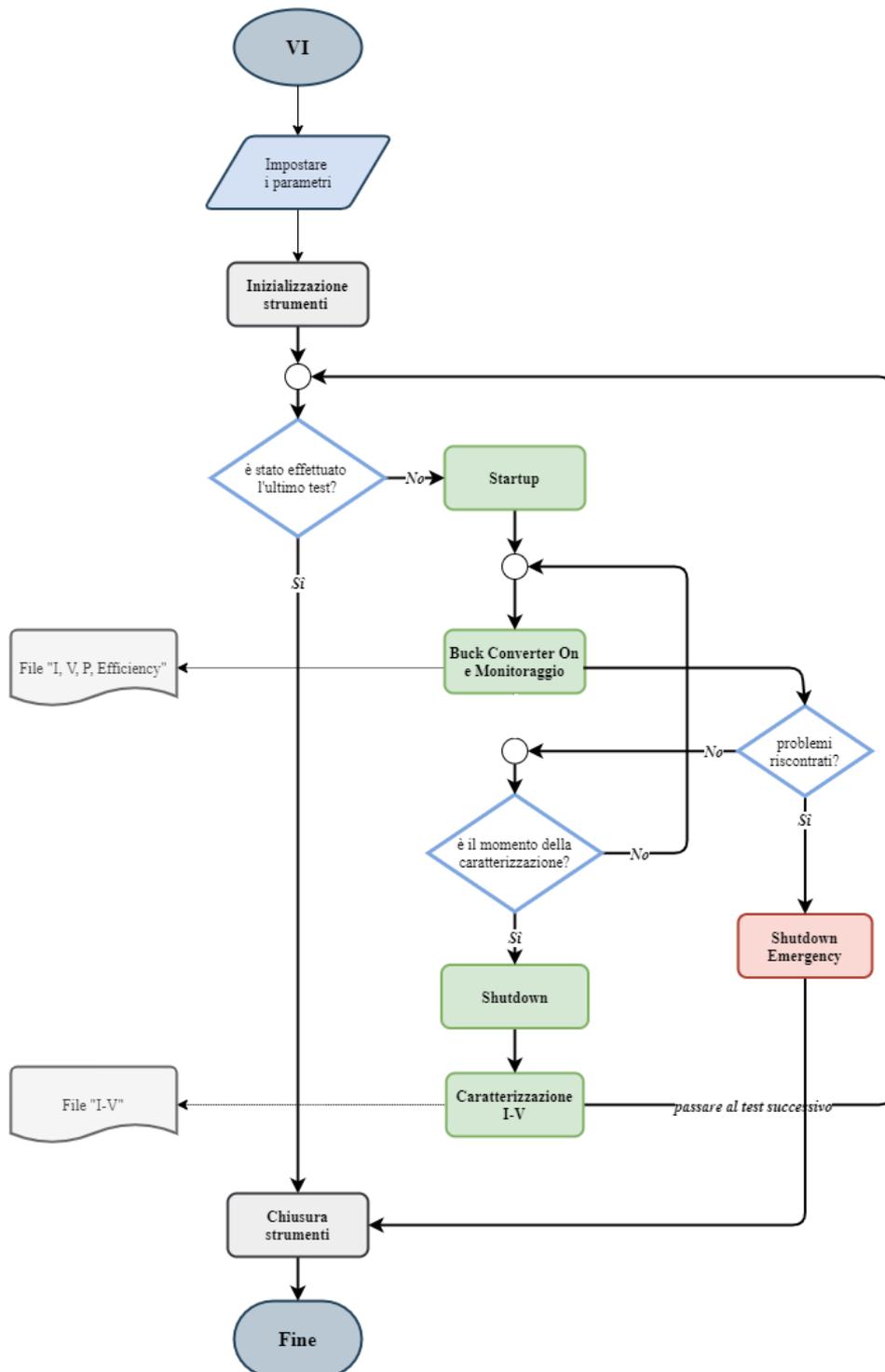


Figura 3.1: Diagramma di flusso.

transistori (HS, LS). Dopo un certo numero di passaggi - stabiliti dall'utente in modo arbitrario prima di avviare lo strumento - tra fase di conversione e la fase di caratterizzazione, l'algoritmo termina con lo spegnimento del circuito mediante le operazioni di disabilitazione degli strumenti coinvolti. Le grandezze d'interesse vengono memorizzate su opportuni file di testo su disco.

Inizialmente, per poter procedere con l'inizializzazione degli strumenti, l'utente deve impostare i seguenti parametri:

- numero di prove consecutive  $N_{test}$  da effettuare;
- tensione d'ingresso  $V_{IN}$  applicata dall'alimentatore e corrente d'uscita  $I_{OUT}$  desiderata dal carico;
- frequenza di commutazione del buck converter (frequenza di *switching*)  $f_{SW}$  e duty cycle  $D$  dell'onda quadra prodotta dal generatore di funzioni che incide sui driver dei gate dei transistori;
- parametri della rampa di salita e di discesa di tensione e di corrente, come la durata temporale  $T_{SU}/T_{SD}$  e il numero di step  $N$ ;
- valore di soglia della corrente d'ingresso  $I_{IN}^{TH}$ , d'uscita  $I_{OUT}^{TH}$  e dell'efficienza  $E f f^{TH}$  da confrontare con i valori misurati;
- tempo di funzionamento da convertitore  $T_{buck}$ ;
- percorso dei file creati durante la fase di monitoraggio e di caratterizzazione;
- altre specifiche e operazioni preliminari per predisporre gli strumenti per una corretta caratterizzazione, completando la configurazione e impostando i sistemi di protezione interni.

A seguire, inizia il ciclo di operazioni da ripetere per ogni istante di caratterizzazione impostato. Come già descritto precedentemente, il primo blocco è quello di *Startup* con la rampa di avvio caratterizzata da tre fasi: prima il carico applica un piccolo gradino di corrente, poi la PSU eroga gradualmente la tensione fino ad arrivare al valore nominale e infine si raggiunge con una seconda rampa in corrente il valore nominale  $I_{OUT}$ . In questo modo, si cerca di ridurre al minimo il rischio di una corrente all'avvio troppo elevata - che

porterebbe a dei danni circuitali - tenendo sotto controllo, allo stesso tempo, la corrente che assorbe il carico. I valori usati e i passaggi verranno spiegati più nel dettaglio nella sezione 3.3.

Dopo le procedure di accensione, è presente un ciclo caratterizzato dal blocco di conversione *Buck Converter ON e Monitoraggio*. Il circuito lavora in modalità convertitore e misura, dopo ogni intervallo di tempo scelto in input, la tensione e la corrente d'ingresso e di uscita e la resistenza del termistore. Con questi dati, è immediato il calcolo della potenza e dell'efficienza. Per effettuare un ulteriore controllo sullo stato del circuito, tutte queste grandezze vengono memorizzate in unico file accompagnate da un valore temporale che indica quando è stato effettuato il rilevamento. Date le criticità che si possono avere nel caso in cui la corrente che circola nel circuito abbia un valore più elevato di quello nominale, si effettua una continua comparazione con le soglie impostate e, se viene individuato un superamento, si esegue immediatamente una procedura di arresto di emergenza per ridurre al minimo eventuali danni. In caso contrario, con un funzionamento regolare, il ciclo si ripete fino a quando il tempo trascorso dall'inizio del processo non è uguale a uno dei tempi di caratterizzazione.

Per la caratterizzazione il circuito deve essere riportato allo stato off: si procede in modo analogo all'avvio con un blocco di *Shutdown* costituito da una rampa speculare di discesa. I dispositivi possono, quindi, essere caratterizzati in base alle modalità scelte, partendo dal transistore high side e proseguendo con il low side. Come nella fase di monitoraggio, anche in questo caso le grandezze misurate vengono riportate in un file per effettuare una verifica più precisa dei valori rilevati. Le caratteristiche di nostro interesse, che comprendono le curve  $I_D-V_{GS}$  e  $I_G-V_{GS}$  a  $V_{DS}$  fissata, vengono opportunamente ottenute dalla SMU 2612B. Infatti, attraverso la modalità *sweep*, lo strumento può applicare una rampa di tensione o corrente - in base alla sorgente scelta - quindi passare da un valore iniziale a un valore finale in maniera lineare. Nel caso in esame, si utilizza questa modalità per  $V_{GS}$ , la variabile indipendente di entrambe le curve, in modo da misurare la corrente associata ai diversi valori che assume  $V_{GS}$  ed ottenere così la curva richiesta.

Tali operazioni vengono ripetute ciclicamente fin quando il tempo trascorso da inizio misura non è uguale all'ultimo tempo di caratterizzazione impostato.

Appena questa condizione risulta verificata, vengono chiusi tutti i processi attivi sugli strumenti e il circuito viene riportato nello stato off.

## 3.2 Ambiente di sviluppo

Per l'implementazione del sistema appena descritto, si è scelto di utilizzare l'ambiente di sviluppo software *LabVIEW* sviluppato da *National Instruments*. Si tratta di un linguaggio di programmazione grafica, detto linguaggio G, che utilizza diagrammi a blocchi (collegamenti tra vari oggetti grafici) al posto di linee di testo sulle quali si basa un classico linguaggio di programmazione. Viene compilato e non interpretato, risulta quindi molto vantaggioso per il controllo di strumentazione data la sua facilità di utilizzo e i brevi tempi di esecuzione. Per tale motivo, viene spesso impiegato per l'automazione industriale - per esempio per l'acquisizione e l'analisi di dati, il controllo di processi, ecc. - dove è fondamentale un breve tempo di risposta al programma.

Un altro punto di forza di questo linguaggio è la modularità: un programma - detto Virtual Instrument (VI) - può contenere al suo interno diversi sottoprogrammi - detti subVI. In questo modo, ogni blocco (modulo) può essere costruito in maniera indipendente, testato singolarmente e poi inserito nel progetto completo fino a creare una struttura gerarchia di VI e subVI.

I VI sono composti da due schermate principali:

- Pannello di controllo (*Front Panel*), che rappresenta l'interfaccia utente del programma e che permette di inserire le grandezze in input tramite i terminali d'ingresso - detti controlli - e di visualizzare le grandezze in output tramite i terminali d'uscita - dette indicatori;
- Diagramma a blocchi (*Block Diagram*) non visibile dall'utente, che rappresenta il codice sorgente in formato grafico; esso può interagire con i terminali del pannello di controllo attraverso funzioni, strutture, costanti, subVI e altri blocchi per descrivere l'applicazione desiderata.

È stato scelto *LabVIEW* perché è pienamente compatibile con tutti i modelli di strumenti programmabili utilizzati in questo progetto, nonché con il protocollo di comunicazione utilizzato per il collegamento tra le apparecchiature e il PC. In questo modo, è possibile avere un controllo completo degli

apparati tramite i driver resi disponibili dai costruttori. In particolare, oltre a riuscire a definire in modo ampiamente flessibile tutti i parametri di funzionamento degli strumenti, è possibile sincronizzarli in modo accurato. La sincronizzazione, come già discusso, è una caratteristica fondamentale del sistema di acquisizione oggetto di questo elaborato.

### 3.3 Descrizione del software

Lo strumento virtuale presenta la struttura gerarchica di Figura 3.18 a pagina 46 e comprende sia i VI appartenenti alle librerie degli strumenti sia i VI creati o modificati per questa attività. Di seguito verranno descritti i VI realizzati.

#### 3.3.1 Main

Il programma principale presenta il *Front Panel* di Figura 3.2 a fronte.

È il VI con cui l'utente può interagire, dedicato alla configurazione dei parametri che regolano il funzionamento del banco di misura. Si illustrano brevemente i controlli e gli indicatori presenti nella schermata, racchiusi nelle cinque sezioni evidenziate:

- Sezione 1: il controllo *VISA resource name* identifica univocamente una sessione I/O dello strumento, trasmettendo tutte le informazioni di configurazione necessarie per l'esecuzione. Tramite il *cluster*, è possibile selezionare i rispettivi indirizzi degli strumenti attraverso i menù a tendina.
- Sezione 2: sono presenti i controlli dei subVI *startup.vi/shutdown.vi*, ovvero il numero di prove consecutive da effettuare, i parametri della rampa di tensione e corrente, dell'onda quadra che controlla i gate e i valori di tensione e corrente desiderati. I due subVI sono simmetrici, quindi la durata temporale e il numero di step della rampa sono gli stessi sia per quella di avvio che per quella di spegnimento.
- Sezione 3: l'utente può inserire manualmente il vettore dei tempi di funzionamento in modalità convertitore, indicando nel selettore *Measure*

### 3.3. DESCRIZIONE DEL SOFTWARE

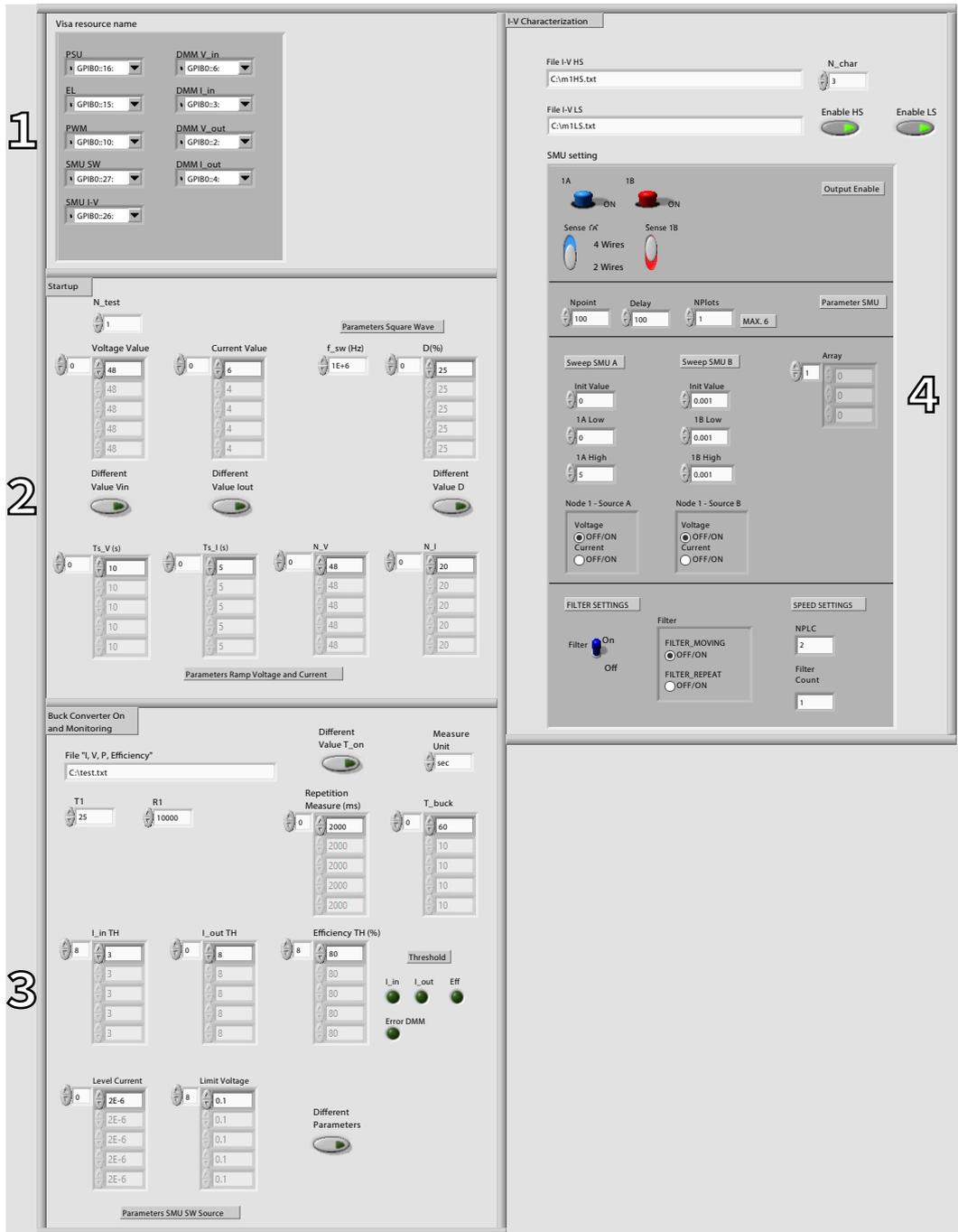


Figura 3.2: Front Panel di main.vi.

*Unit* l'unità di misura scelta (secondi, minuti o ore), oppure può scegliere un asse dei tempi logaritmico automatico sempre attraverso il selettore (item: log). In questa sezione sono presenti i controlli e gli indicatori del subVI DC/DC.vi, ovvero i valori delle soglie critiche, i LED che mostrano la causa di un eventuale spegnimento di emergenza, il tempo che intercorre tra due misure consecutive nella fase di monitoraggio, le misure di resistenza e di temperatura effettuate prima della prova (circuiti nello stato off) e il percorso del file su cui vengono salvati tutti i valori misurati e calcolati. Per la misura di resistenza si possono configurare opportunamente i parametri della SMU *Level Current* (intensità di corrente) e *Limit Voltage* (limite di tensione). Il valore minimo che può assumere la variabile *Repetition* - che indica il tempo (in ms) che intercorre tra due misure - per garantire il tempo necessario al DMM per effettuare correttamente la lettura è di 2 s.

- Sezione 4: sono presenti i parametri che si occupano della fase di caratterizzazione, ovvero i controlli del subVI *characterization.vi*. È possibile abilitare o disabilitare separatamente la caratterizzazione dei due transistori e inserire il percorso dei due file destinati al salvataggio dei punti delle caratteristiche I-V, il numero di caratterizzazioni consecutive da eseguire e le impostazioni della SMU. Il *cluster* corrispondente (*SMU setting*) è suddiviso in 4 riquadri che, dall'alto verso il basso, hanno i seguenti scopi: abilitazione o disabilitazione delle uscite dei canali della SMU e selezione della modalità a 2 o 4 fili per le misure effettuate; selezione del numero di punti, del ritardo di tempo tra due misure consecutive, del numero di grafici (massimo sei) e del numero di caratteristiche consecutive; selezione del tipo di sorgente (tensione o corrente) e dei parametri di sweep (valore iniziale e intervallo); configurazione del filtro.

Molti controlli sono presenti nel formato vettore in modo da personalizzare ogni tipo di test, abilitando il relativo pulsante *Different Value* e impostando il valore desiderato ad ogni prova. Nel caso in cui *Different Value* sia disabilitato, la variabile assume in ogni prova il valore impostato nella prima cella. Per i vettori che non presentano il corrispondente pulsante *Different Value* (es.  $T\_V$  e a  $N\_V$ ), è possibile personalizzare la prova - in modo analogo a quanto sopra

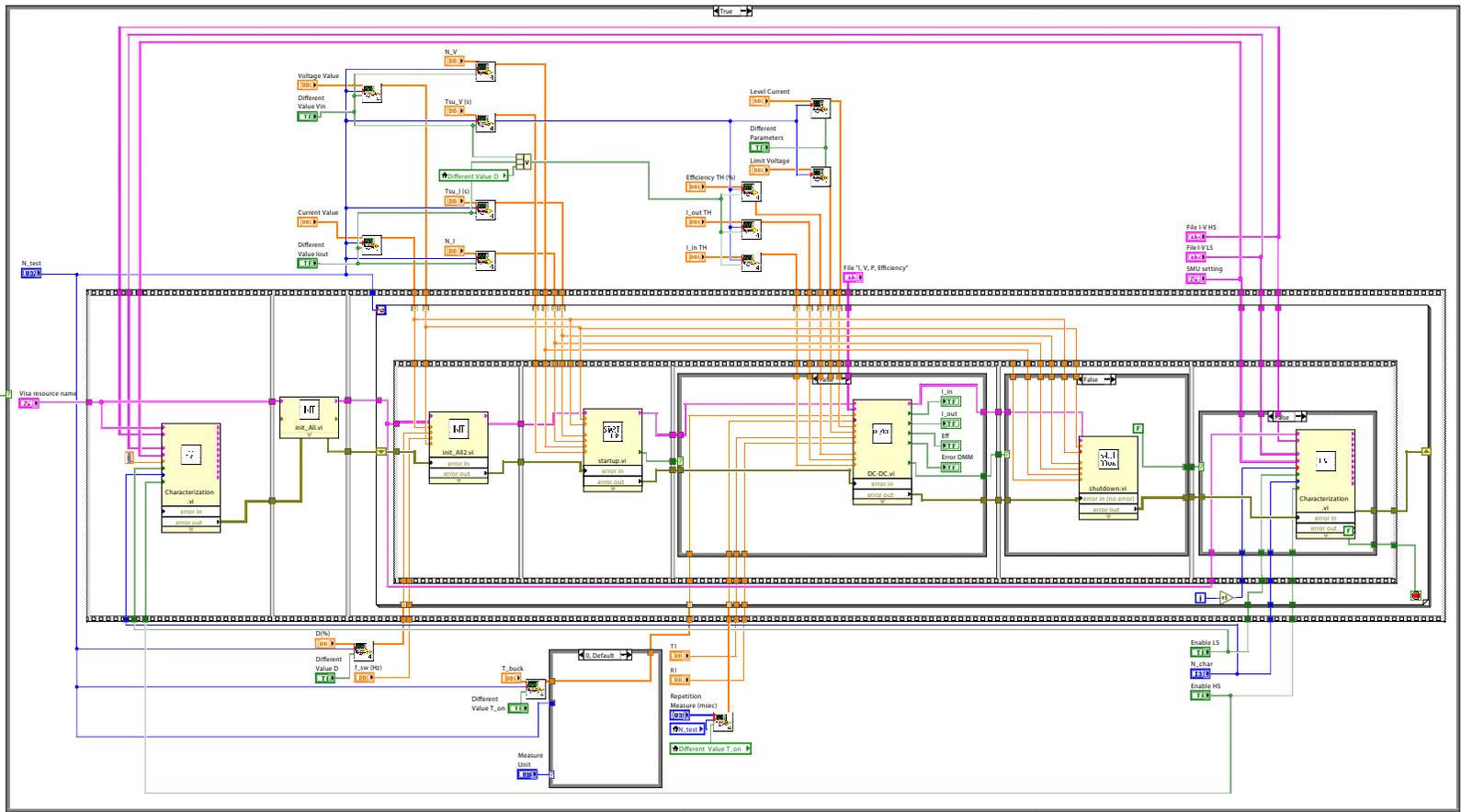


Figura 3.2: Block Diagram di main.vi.

affermato - abilitando il pulsante relativo alle grandezze da cui dipendono. Per esempio, i parametri della rampa di tensione dipendono dal livello di tensione d'ingresso selezionato. Di conseguenza, per controllare i vettori  $T\_V$  e  $N\_V$  può essere abilitato o disabilitato il pulsante *Different Value Vin*. Si possono fare considerazioni analoghe per i parametri della rampa di corrente ( $T\_I$  e  $N\_I$ ) che dipendono dall'intensità di corrente d'uscita, per le soglie ( $I\_in TH$ ,  $I\_out TH$  e *Efficiency TH*) che dipendono dal punto di lavoro e per il tempo che intercorre tra due misure consecutive (*Repetition Measure*) che dipende dal tempo di funzionamento da convertitore.

Il *Block Diagram* è caratterizzato da una struttura di tipo Flat Sequence costituita da tre frame, vedi Figura 3.2 nella pagina precedente. Il primo frame si occupa della caratterizzazione iniziale necessaria per valutare il degrado attraverso un confronto con le caratteristiche successive ricavate in condizioni di stress; il secondo frame contiene la prima parte della fase di inizializzazione degli strumenti; il terzo frame è il fulcro del programma, contenente il ciclo di caratterizzazione in-situ e i relativi blocchi. Quest'ultimo è costituito da una struttura For Loop esterna con un terminale condizionale, all'interno della quale si sviluppa una seconda Flat Sequence composta da cinque frame.

Il ciclo esterno quindi si ripete  $N\_test$  volte salvo che non si verifica la condizione che incide sul terminale di arresto *Stop if True*. Si può notare dallo schema che i casi True delle Case Structure determinano una procedura di spegnimento di emergenza che salta eventualmente la fase da convertitore e di caratterizzazione e che comunica True al terminale condizionale per uscire dal ciclo e terminare il test.

La Flat Sequence interna ripercorre i passaggi descritti nel diagramma di flusso illustrato precedentemente. Da sinistra verso destra sono presenti i seguenti subVI: *init\_All2.vi*, *startup.vi*, *DC-DC.vi*, *shutdown.vi/shutdown\_emergency.vi* e *characterization.vi*, ciascuno racchiuso nel proprio frame e con i rispettivi controlli e indicatori collegati.

## Operation Mode

Come precedentemente affermato, per poter passare da una fase ad un'altra occorre una commutazione della matrice di relè. A tal fine, è stato creato il subVI *SMU\_DigitIO\_Port.vi*, che presenta il *Block Diagram* di Figura 3.4.

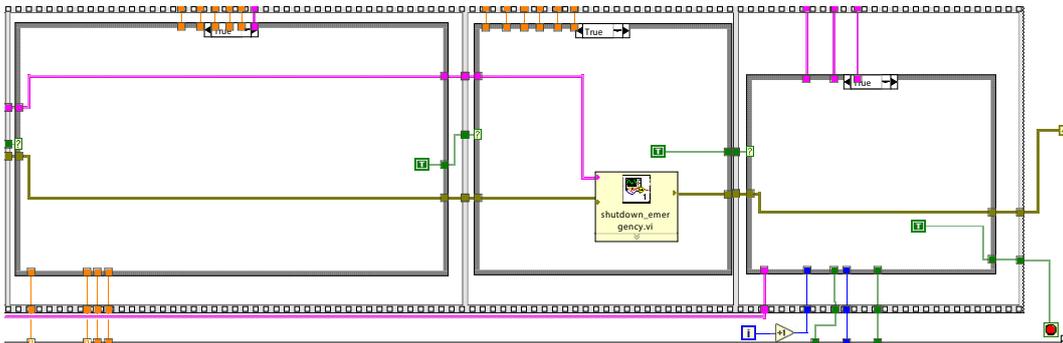


Figura 3.3: Focus sulla procedura di spegnimento di emergenza.

All'interno del programma il blocco viene sempre accompagnato, nel frame successivo a quello in cui viene inserito, da un ritardo di 50 ms per permettere ai relè di commutare.

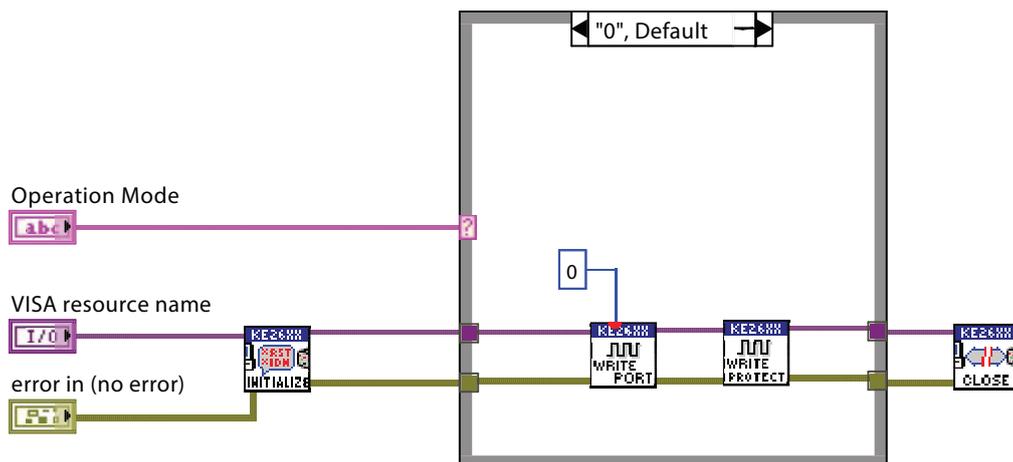


Figura 3.4: Block Diagram di SMU\_DigitIO\_Port.vi.

Lo schema è costituito da una semplice sequenza standard (inizializzazione, operazione e chiusura) di blocchi appartenenti alla libreria della SMU che traduce il comando di scrittura sulla porta DIGITAL I/O *digio.writeport(data)*. Attraverso il selettore *Operation Mode*, si distinguono quattro casi nei quali vengono pilotati i diversi valori dell'attributo *data* ricavati dalla conversione da binario a decimale della sequenza di bit comunicata sulla porta che comanda i relè (0: interruttore aperto; 1: interruttore chiuso). In base alle configurazioni della matrice e al collegamento tra le linee della porta DIGITAL I/O e i relè, *data* deve assumere i seguenti valori: 64 per modalità "off" (caso 0 della Case Structure), 252 per modalità "Buck Converter" (caso 1), 15681 per

modalità "HS Characterization" (caso 2, caratterizzazione del transistor high side) e 3778 per modalità "LS Characterization" (caso 3, caratterizzazione del transistor low side).

Si prosegue con la descrizione dei subVI sopraccitati.

### 3.3.2 Init

I subVI relativi alla fase di inizializzazione sono `init_All.vi` e `init_All2.vi` e si occupano, in sequenza, della selezione della modalità di funzionamento "off" e dell'inizializzazione degli otto strumenti (eccetto il carico) attraverso i relativi blocchi.

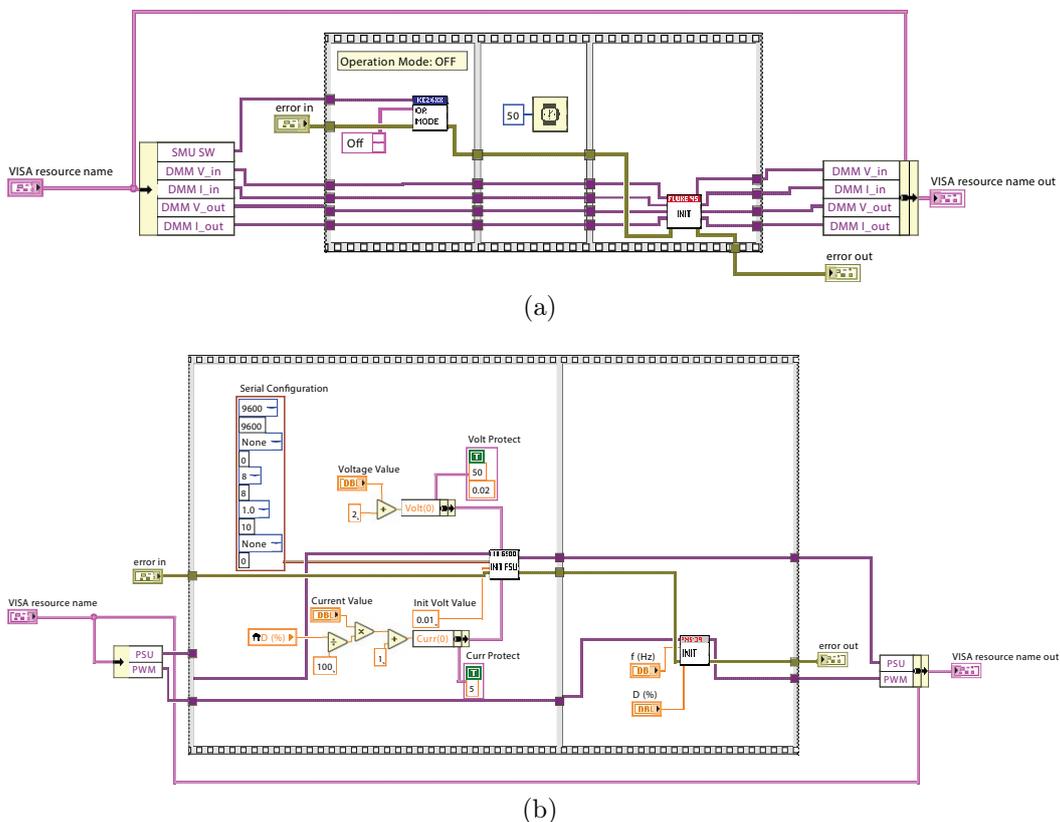


Figura 3.5: *Block Diagram* di `init_All.vi` e `init_All2.vi`.

La sequenza presente in `initPSU.vi` esegue i seguenti comandi: abilita il controllo remoto; attiva e imposta il limite interno di tensione e di corrente (OVP e OCP); configura il valore di tensione iniziale da applicare e, infine, abilita l'uscita dell'alimentatore. Per il blocco in esame sono state associate le

seguenti costanti ai controlli: tensione iniziale di 0.01 V (tensione minima che lo strumento permette di impostare); parametri di default per la configurazione seriale; limite di corrente e di tensione derivante dal punto di lavoro scelto. Prima di abilitare l'uscita, viene applicato un ritardo di 600 ms in quanto si è notato sperimentalmente che lo strumento necessita di tale tempo di attesa per una corretta configurazione e abilitazione dell'uscita.

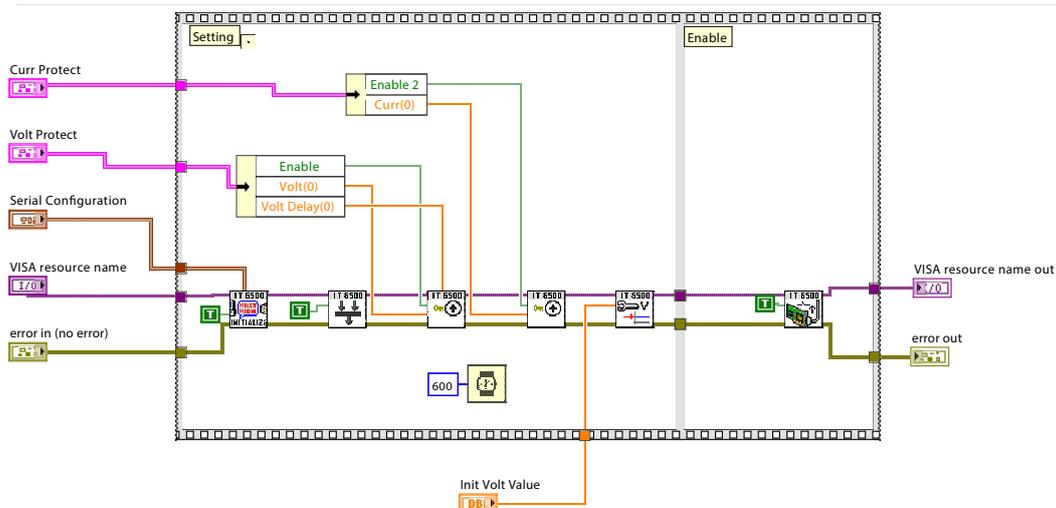


Figura 3.6: Block Diagram di `initPSU.vi`.

Il subVI `init_4DMM.vi` è costituito da quattro blocchi `initDMM.vi` - uno per ogni multimetro utilizzato - configurati in modo da averne due che effettuano una misura di tensione continua (*DC Volts*) e due che ne eseguono una di corrente continua (*DC Current*). È stata selezionata la modalità *Autorange* con un tasso di 20 letture/s (valore:Fast).

La configurazione della forma d'onda pilotata dal generatore di funzioni avviene attraverso il subVI `initPWM.vi`, impostando il tipo di onda, l'ampiezza, la frequenza e il duty cycle. Per avere una dinamica di [0, 5] V occorre selezionare un *DC Offset* di 2.5 V e un ampiezza (picco-picco) di 5 V.

### 3.3.3 Startup/Shutdown

Il subVI `startup.vi` presenta il *Block Diagram* di Figura 3.10 a pagina 37.

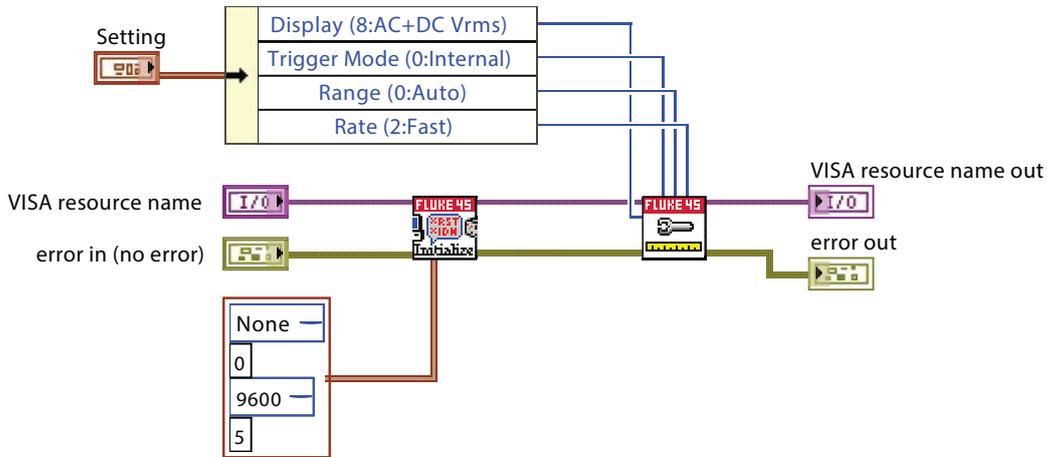


Figura 3.7: Block Diagram di `initDMM.vi`.

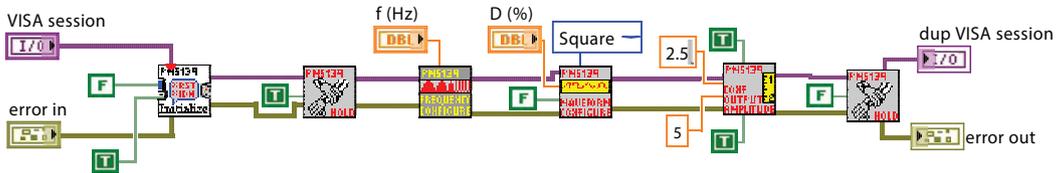


Figura 3.8: *Block Diagram* di `initPWM.vi`.

Nel primo frame della Flat Sequence si ha l'inizializzazione del carico, selezionando la modalità di funzionamento a tensione costante per poter applicare inizialmente una tensione di 0 V ai capi del condensatore di uscita.

Successivamente, si seleziona la modalità di funzionamento "Buck Converter" e, attraverso una serie di step, si genera la rampa di salita usando i blocchi delle librerie del carico e dell'alimentatore. Inizialmente, si impone una tensione d'ingresso e d'uscita di 0 V per i motivi precedentemente discussi, poi si applica un gradino di corrente d'uscita di 1 A, la rampa di tensione e, infine, la rampa di corrente - entrambe fino al valore nominale. Tra i frame sono stati posti dei blocchi di ritardo (in ms) per permettere al dispositivo di reagire opportunamente ai comandi. Il tempo totale impiegato per svolgere il blocco di avvio è di  $(T_I^{SU} + T_V^{SU} + 1.25)s$ , dove 1 s viene impiegato nel passaggio da modalità di funzionamento tensione costante a corrente costante per chiudere opportunamente la sessione aperta del carico.

La sequenza presente in `initEL.vi` ripercorre le operazioni da effettuare per configurare il carico elettronico: scelta della modalità di funzionamento; impostazione del range, valore massimo e minimo di tensione; abilitazione e

settaggio del limite interno di corrente (OCP); configurazione del valore di corrente iniziale desiderato e, infine, abilitazione dell'ingresso del carico. I valori associati alle costanti collegate ai terminali in ingresso sono i seguenti: corrente iniziale di 0 A; range di 20 A, tensione massima di 20 V e tensione minima di 0 V; limite di corrente di 10 A.

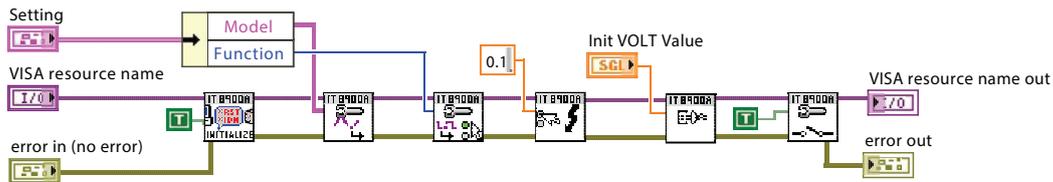


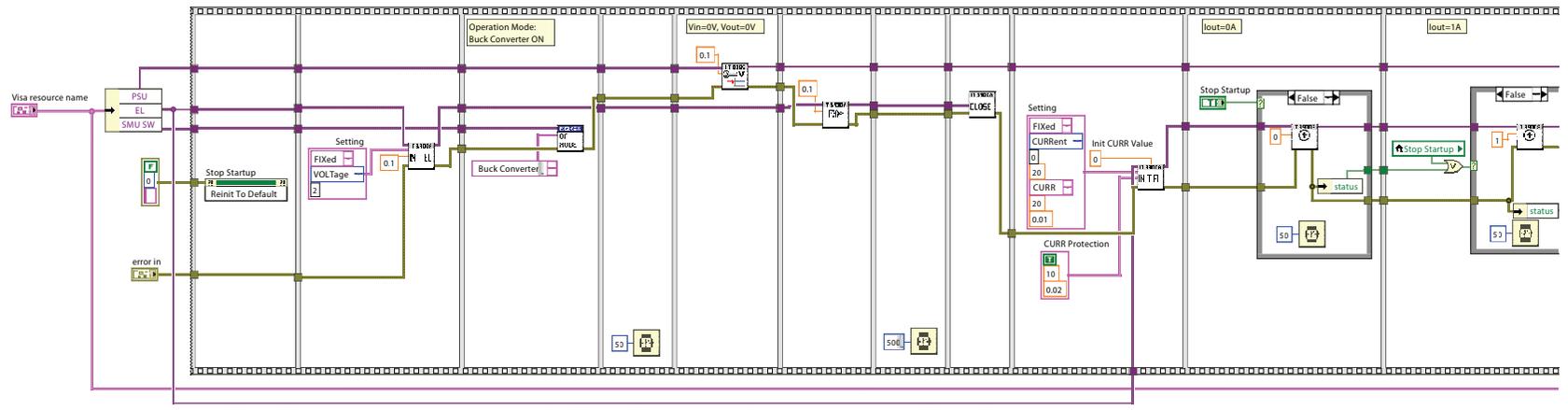
Figura 3.9: *Block Diagram* di `initEL.vi`.

La rampa di tensione/corrente viene creata attraverso un ciclo For Loop di  $N_V$  step scelti dall'utente. Ad ogni iterazione, che avviene ogni  $Time/N_V$  secondi, lo Shift Register incrementa o decrementa il valore di tensione/corrente in base alla differenza tra il valore iniziale e il valore finale.

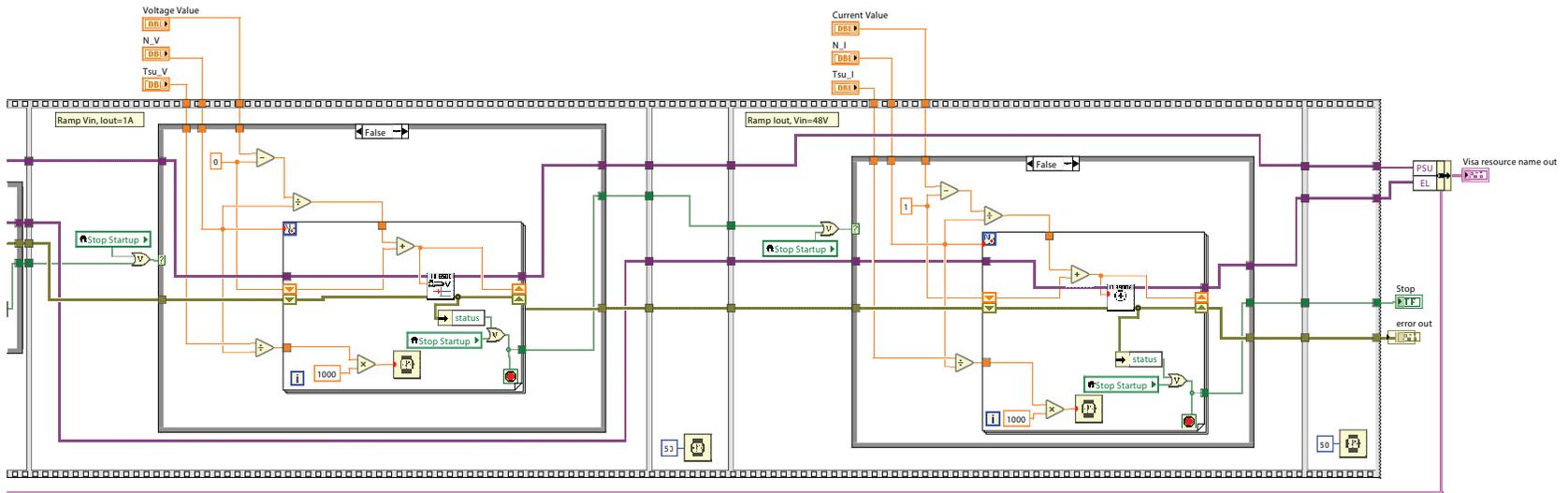
Dopo aver ultimato la fase di inizializzazione, sono presenti le Case Structure che hanno il ruolo di interrompere la rampa di salita e di comunicare True all'indicatore *Stop* del subVI nel caso in cui l'utente abbia premuto il pulsante *Stop Startup*. Il VI generale procede verso la fase di spegnimento senza eseguire la fase di funzionamento da convertitore.

Il *Block Diagram* del subVI `shutdown.vi` è speculare a quello appena descritto (eccezion fatta per le Case Structure), imponendo delle rampe di discesa, la commutazione della modalità di funzionamento da "Buck Converter" a "off" e la chiusura delle sessioni attive del carico, della PSU e del generatore di funzioni. Il tempo totale impiegato per svolgere il blocco di spegnimento è di  $(T_I^{SD} + T_V^{SD} + 1.65)s$  con considerazioni analoghe a quelle fatte per il blocco di avvio. Si riporta il diagramma in Figura 3.11 a pagina 38.

Nel caso del subVI `shutdown_emergency.vi` il valore di tensione e di corrente di partenza vengono misurati rispettivamente dalla PSU e dal carico. Il tempo totale di arresto, determinato dalla rampa di tensione e di corrente e i tempi di attesa applicati per un corretto funzionamento, è di 2.2s così da reagire tempestivamente ad una eventuale situazione potenzialmente dannosa.

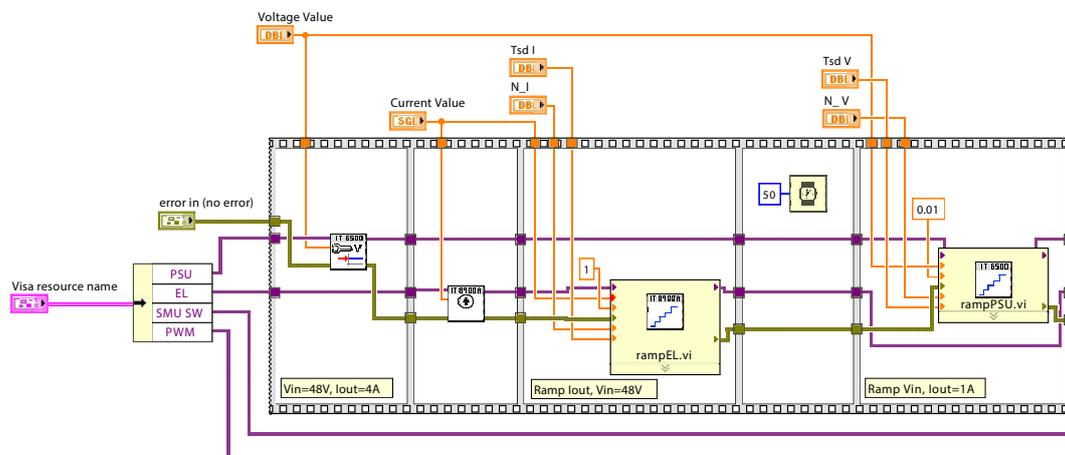


(a)

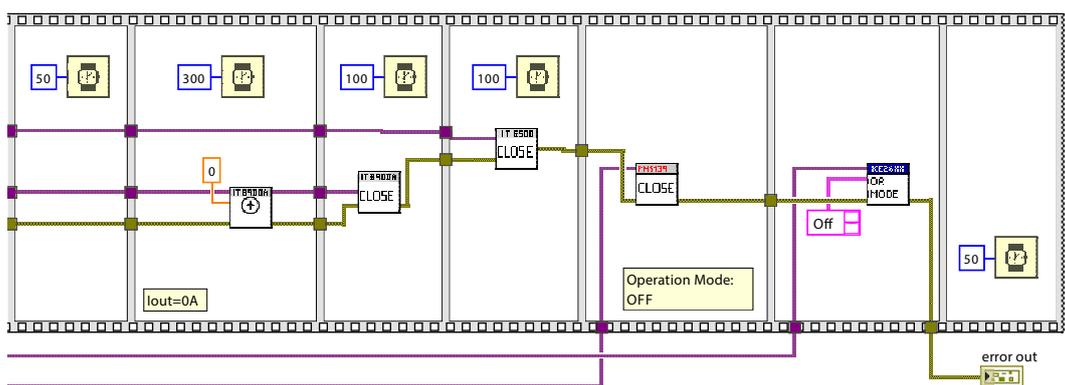


(b)

Figura 3.10: Block Diagram di startup.vi.



(a)



(b)

Figura 3.11: Block Diagram di shutdown.vi.

### 3.3.4 DC-DC Converter

Il subVI DC-DC.vi presenta il *Block Diagram* di Figura 3.13 a pagina 40.

Il diagramma è costituito da una Flat Sequence di quattro frame in cui il secondo e il terzo si occupano rispettivamente della fase di apertura e di chiusura della SMU 2601. Il frame interno è composto da un ciclo For Loop che si occupa sia della misura delle grandezze d'interesse attraverso l'utilizzo dei blocchi della libreria del multimetro, sia della creazione del file che riporta

le suddette letture. Il file, salvato sul percorso inserito dall'utente, è suddiviso in righe composte dai seguenti valori: data e ora della misura effettuata,  $V_{IN}$ ,  $I_{IN}$ ,  $V_{OUT}$ ,  $I_{OUT}$ ,  $P_{IN}$ ,  $P_{OUT}$ , efficienza, resistenza e temperatura. Il ciclo, con ritmo delle iterazioni scandito dalla variabile *Repetition*, dura  $T\_buck$  secondi a meno di problemi rilevati o di un'interruzione applicata dall'utente tramite la pressione del pulsante *Stop Converter*.

### Monitoraggio

Il subVI `measure.vi` effettua le letture di tensione e corrente d'ingresso e d'uscita, da cui ricava i rispettivi valori di potenza ed efficienza (espressa in percentuale) e la misura di resistenza del termistore. Tutte queste grandezze vengono raggruppate, per semplicità, in unico cluster.

Il subVI `conv_R-T.vi` converte la lettura di resistenza in un valore di temperatura attraverso la formula (2.1) e i parametri presenti nel datasheet. Attraverso un ciclo While Loop si applica l'equazione utilizzando il valore della costante  $B$  corrispondente al range di temperatura a cui appartiene la temperatura finale.

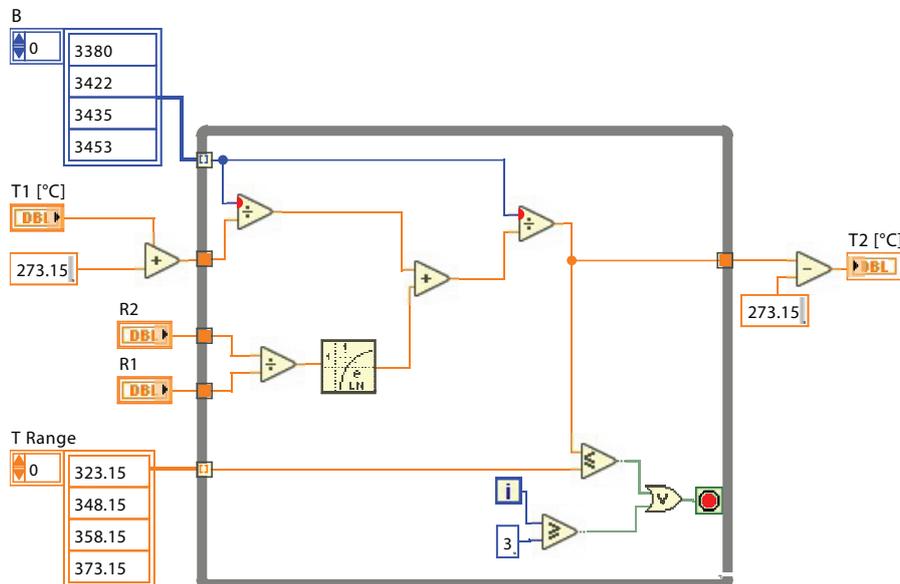


Figura 3.12: *Block Diagram* di `conv_R-T.vi`.

Il subVI `check_TH.vi` estrapola dal cluster solo i valori di corrente ed efficienza e li confronta con le soglie limite impostate.

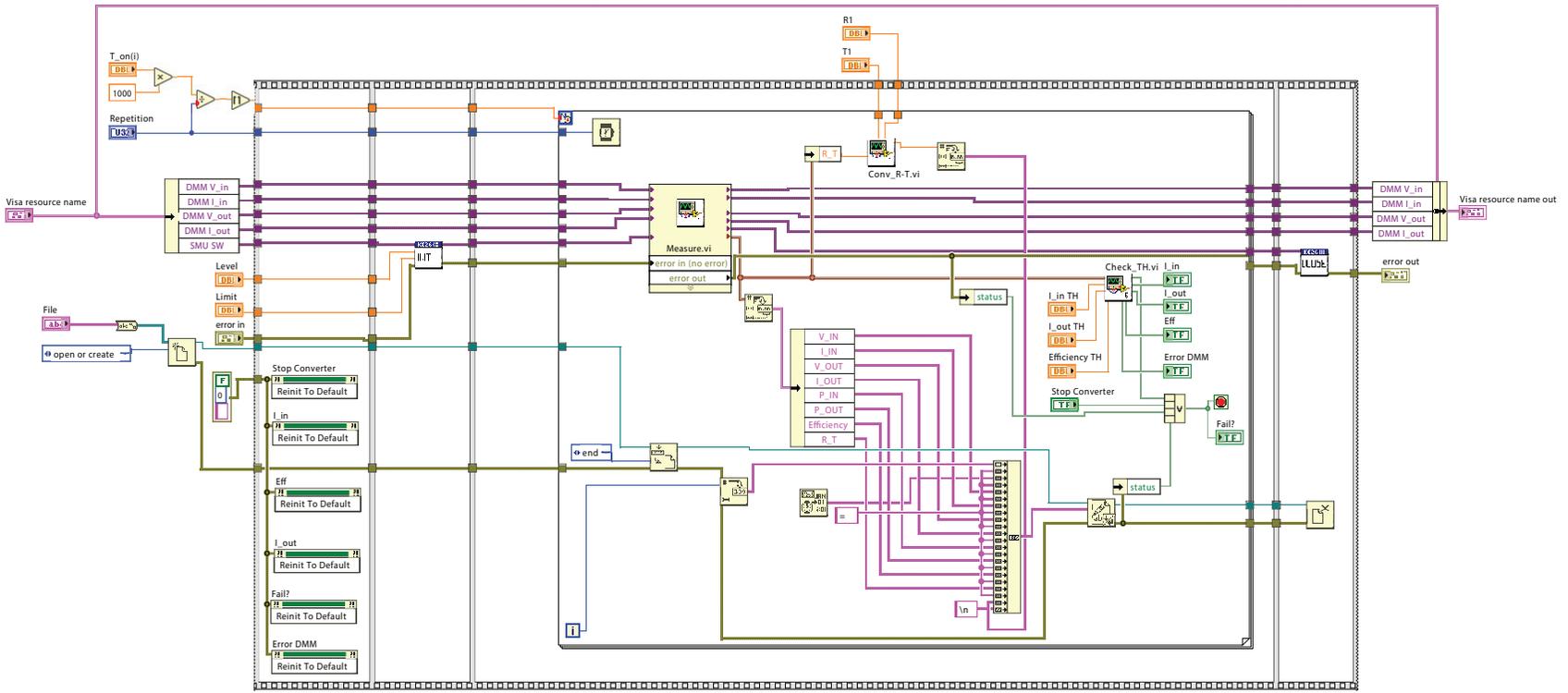


Figura 3.13: Block Diagram di DC-DC.vi.

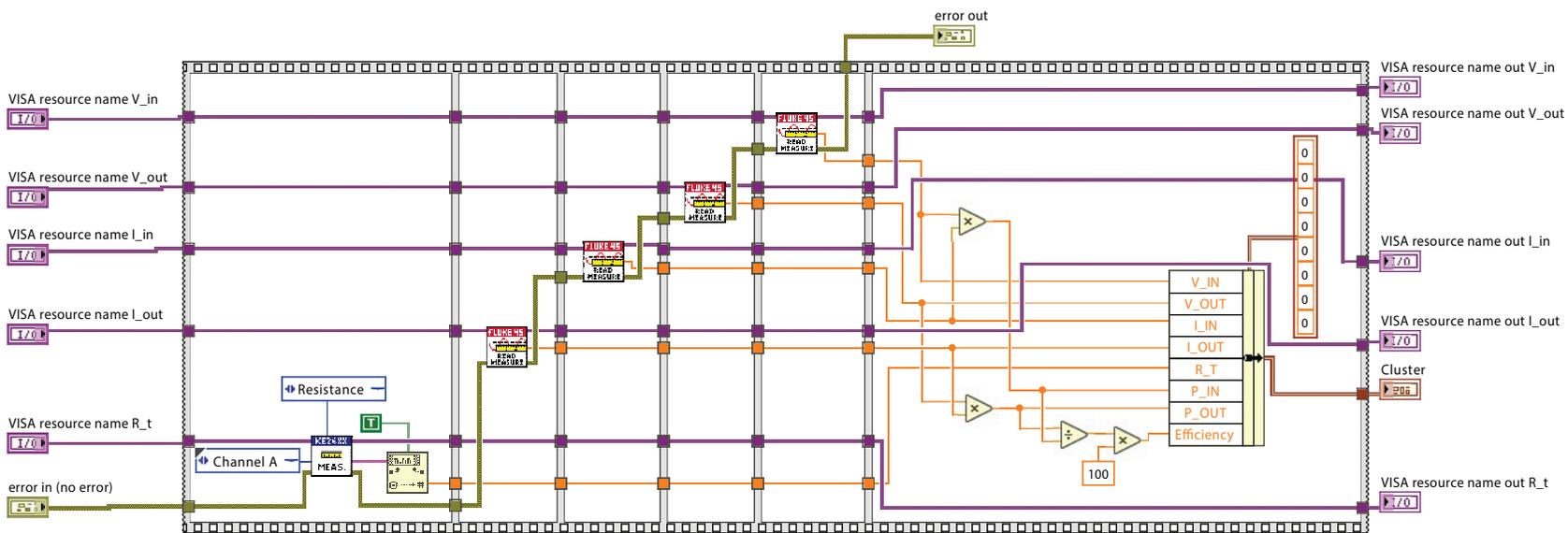


Figura 3.14: Block Diagram di measure.vi.

### 3.3.5 Caratterizzazione I-V

Il subVI `Characterization.vi` presenta il *Block Diagram* di Figura 3.15 nella pagina successiva.

Per entrambe le caratterizzazioni (*high side* e *low side*) racchiuse in due frame consecutivi, si imposta prima la modalità di funzionamento corrispondente e poi si effettua il tracciamento del numero di caratteristiche consecutive desiderate  $N\_char$ .

Il diagramma è costituito da un ciclo `For Loop` all'interno del quale si innesta una `Flat Sequence` di quattro frame. Ad ogni iterazione, si crea il file d'uscita corrispondente all' $i$ -esimo grafico da generare ( $0 \leq i < N_{Plots}$ ) e si imposta opportunamente, attraverso due `Case Structure`, il tipo di sorgente dei due canali della SMU.

Il primo frame si occupa della fase di inizializzazione tramite l'utilizzo del subVI `init.vi`. La sequenza è composta dalle seguenti operazioni, effettuate per entrambi i canali: reset dei nodi per riportare il sistema alle condizioni di funzionamento iniziali; selezione della modalità sorgente di tensione; settaggio del filtro; beeper per ricevere i feedback sugli input; abilitazione dell'uscita; impostazione del valore iniziale da applicare al source e configurazione dei parametri di misura.

Il secondo frame si occupa della fase di caratterizzazione tramite l'utilizzo del subVI `measurement.vi`. Esternamente è presente un ciclo `For Loop` - comandato dal numero di punti  $N\_points$  - allo scopo di applicare la modalità *sweep*: preso l'intervallo  $1xHigh - 1xLow$  (dove  $x = \{a, b\}$  rappresenta il canale) e diviso per  $N\_points$ , si ottiene l'incremento  $i$ -esimo della rampa della variabile indipendente che viene sommato ad ogni iterazione al valore minimo  $1xLow$ . Nella `Flat Sequence` interna viene effettuata la misura e le grandezze ricavate vengono salvate sul file. Dalle seguenti letture verranno poi create le curve visibili sugli indicatori del *Front Panel*.

Gli ultimi due frame si occupano della fase di chiusura, ricevendo un riscontro dei comandi effettuati tramite il beeper.

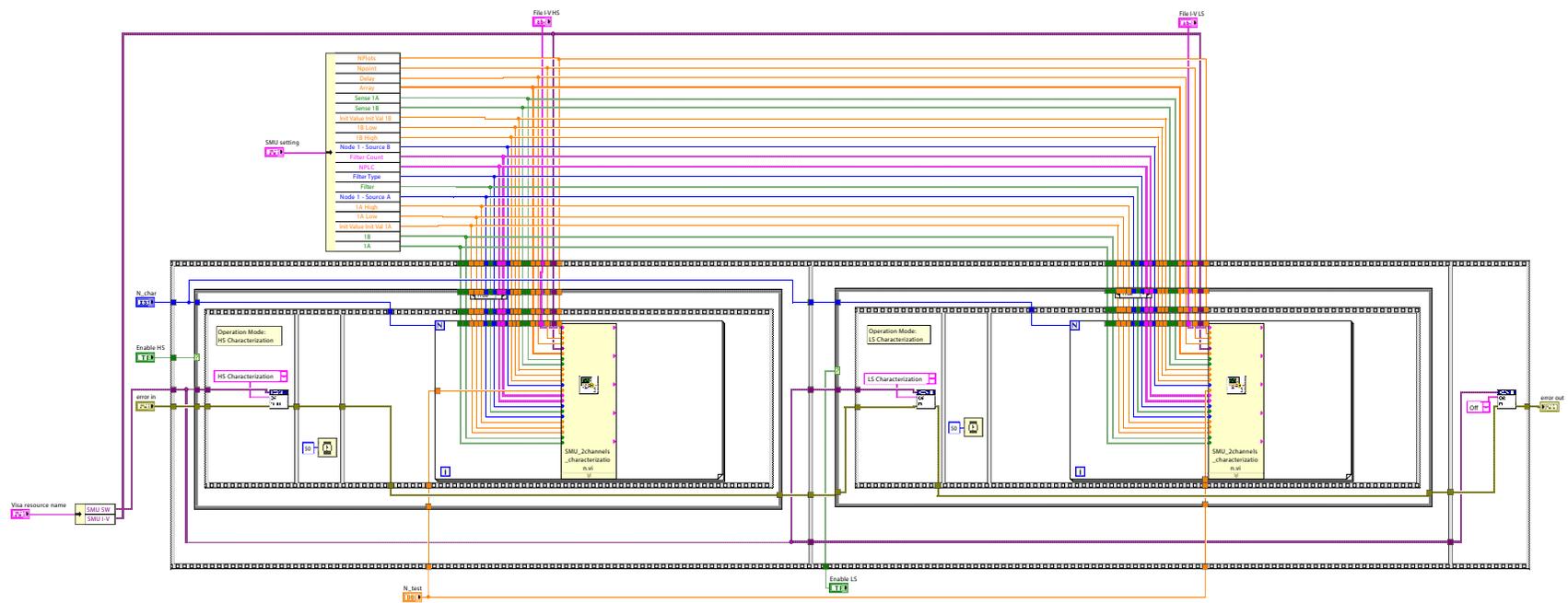


Figura 3.15: Block Diagram di characterization.vi.

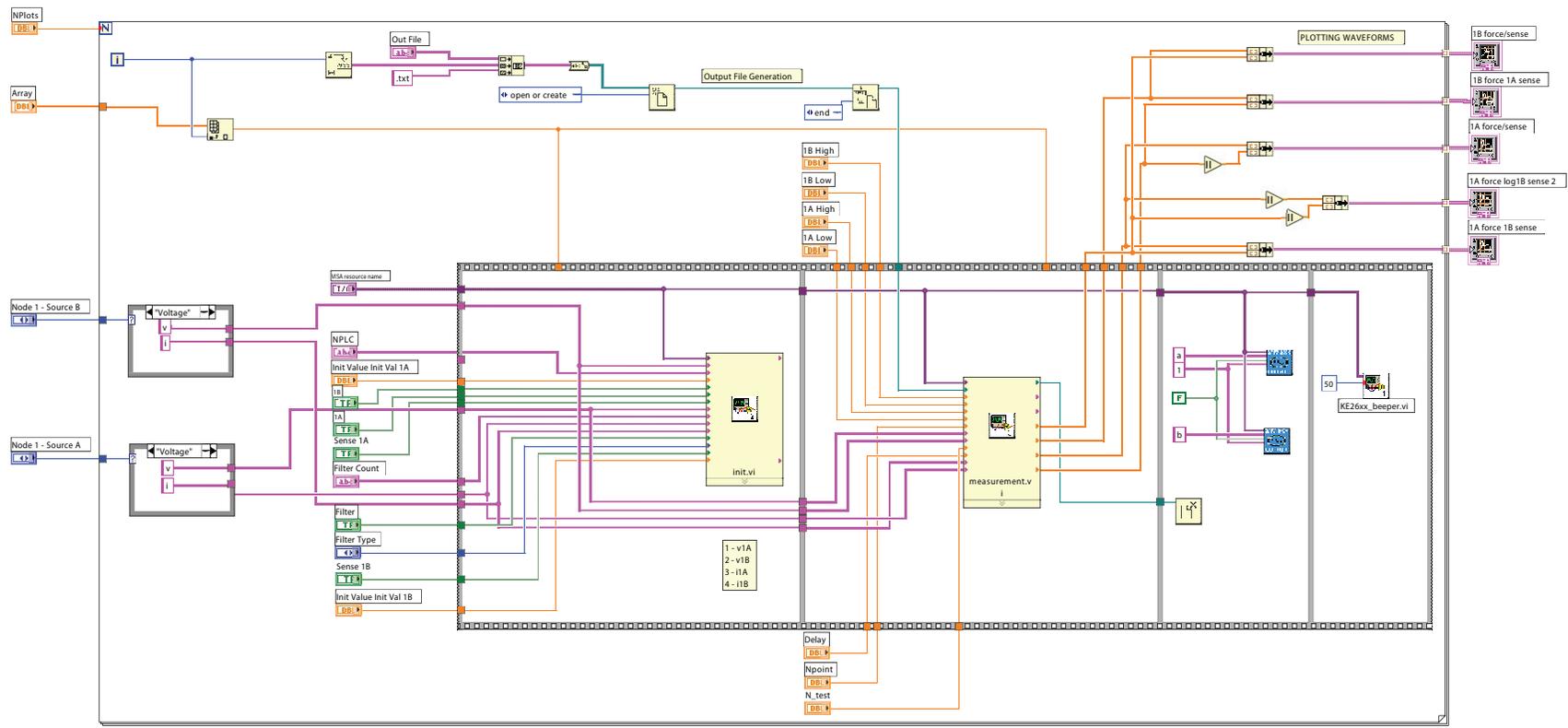


Figura 3.16: Block Diagram di SMU\_2channels\_characterization.vi.

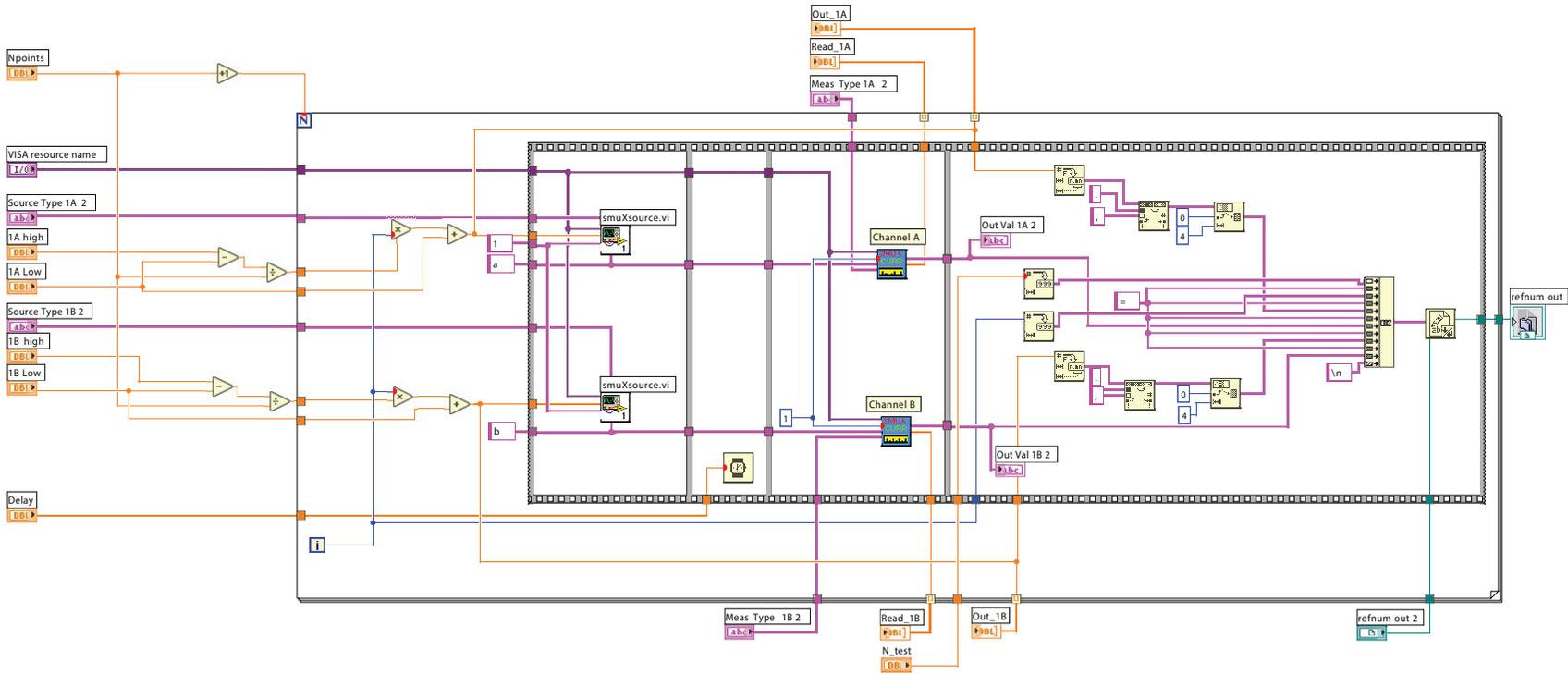


Figura 3.17: Block Diagram di `measurement.vi`.

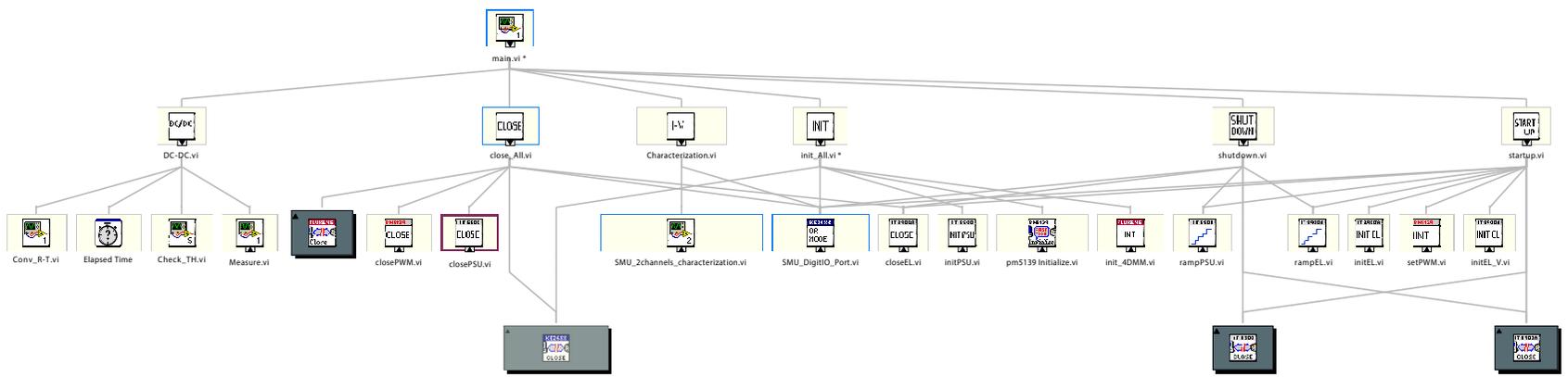


Figura 3.18: Struttura gerarchica del VI.

# Capitolo 4

## Validazione e Risultati

Il banco di misura automatico precedentemente descritto è stato collaudato utilizzando il circuito di potenza d'interesse al fine di garantire un corretto studio sperimentale di affidabilità a lungo termine. Lo strumento virtuale permette di effettuare più test in cascata - scegliendo eventualmente diversi punti di lavoro - e di creare, grazie all'acquisizione dati, un database contenente i valori misurati e calcolati sia durante la fase di funzionamento da convertitore sia durante la caratterizzazione DC. Da tali misurazioni, è possibile ricavare alcuni parametri caratteristici del dispositivo e confrontarli con i dati comunicati dal costruttore [14] in modo da poter verificare il funzionamento del sistema di misura implementato. Nello specifico, il convertitore è stato sottoposto a due tipi di prove:

- monitoraggio dell'efficienza e della temperatura al variare del punto di lavoro - tramite variazione di corrente - nella sola modalità di funzionamento da convertitore (caratterizzazione disabilitata);
- caratterizzazione ai terminali dei dispositivi di potenza effettuata durante il normale funzionamento da convertitore dopo determinati intervalli di tempo.

Vengono di seguito descritte le condizioni e i parametri impostati per le due tipologie di misure e presentati i dati ottenuti ed elaborati mediante script *MATLAB*.

## 4.1 Efficienza e Temperatura

I test sono stati eseguiti imponendo una tensione di ingresso  $V_{IN}$  fissa di 48 V e una corrente di uscita  $I_{OUT}$  variabile da 1 A a 7 A con passo di 1 A. Sono stati impostati i seguenti parametri delle rampe: rampa di tensione di 10 s e 48 step; rampa di corrente di 5 s e 20 step per  $I_{OUT} \leq 5 A$  o di 8 s e 40 step per  $I_{OUT} > 5 A$ . Il tempo di lavoro scelto è di 1 min così da riuscire a valutare la temperatura a regime e la lettura si effettua ogni 2 s in modo da avere in totale 30 misure di efficienza e di temperatura per ogni valore di corrente. Il dato rappresentato nel grafico è il risultato della media di tali misure. Inoltre, per avere una corretta misura di resistenza per ogni valore di corrente settato, è stato necessario impostare due diversi valori di intensità di corrente della SMU:  $1 \mu A$  per  $I_{OUT} \leq 4 A$  e  $2 \mu A$  per  $I_{OUT} > 4 A$ . La prova è stata effettuata con una di frequenza di commutazione del buck converter di 300 kHz e di 500 kHz per valutare anche la sua influenza sulle grandezze di studio.

I grafici vengono riportati in Figura 4.1 e 4.2. I dati rappresentati sono il risultato della medie di 30 misure

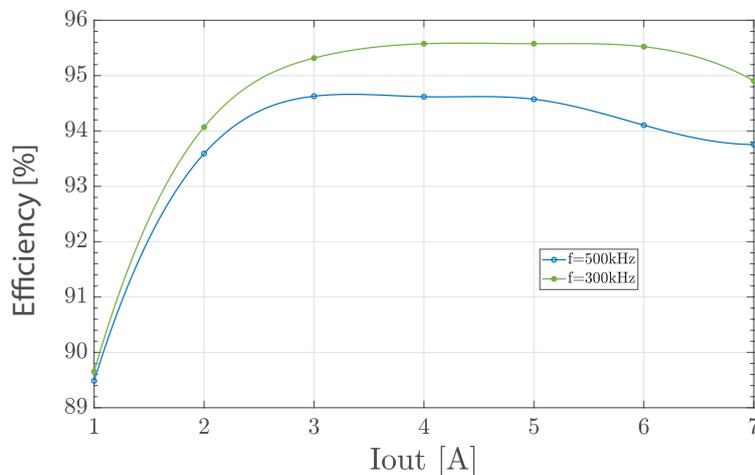


Figura 4.1: Misure di efficienza.

Il convertitore realizzato con dispositivi GaN presenta buone prestazioni per i regimi di potenza considerati, registrando un picco del 95.6% in corrispondenza della frequenza pari a 300 kHz e della corrente pari a 4 A. È possibile osservare dei contributi di perdita crescenti dovuti alle perdite durante la commutazione dei transistori dell'half-bridge del convertitore. Questo

effetto è ampiamente atteso. I risultati sono in linea con quanto teorizzato, considerando gli errori sistematici dovuti ai limiti di accuracy strumentali (in particolare per le misure DC di corrente) e alle aggiunte applicate alla matrice di relè discusse nel capitolo 2. In particolare è ragionevole ottenere efficienze di conversione inferiori rispetto ad altre realizzazioni presenti in letteratura - per le quali sono stati dichiarati efficienze prossime al 98% [15]. Infatti, come già discusso nei capitoli precedenti, il circuito di test presenta componenti aggiuntivi in dei percorsi critici del convertitore rispetto alle realizzazioni convenzionali di buck converter sincroni, comportando inevitabili induttanze parassite. Il mancato raggiungimento di prestazioni dichiarate in letteratura o presenti sul mercato è una conseguenza del fatto che lo scopo del progetto è stressare i transistori al nitruro di gallio attraverso un convertitore ad alta efficienza e non la realizzazione di un convertitore.

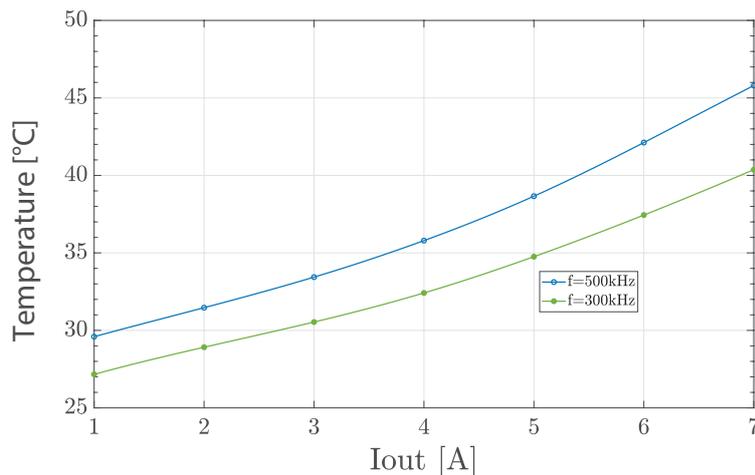


Figura 4.2: Misure di temperatura.

La temperatura aumenta in funzione della corrente secondo un andamento parabolico in quanto aumenta complessivamente la potenza dissipata. La temperatura, a parità di potenza in uscita, è sensibilmente superiore nel caso di frequenza di commutazione pari a 500 kHz se confrontata con il caso di frequenze di commutazione inferiori, a dimostrazione del fatto che aumentano le perdite dovute alla commutazione dei transistori. In generale, i valori di temperatura raggiunti (max 46 °C) si possono considerare accettabili e non degradanti per il dispositivo. Secondo i calcoli effettuati in fase di progetto del

circuito e del sistema di estrazione del calore, la temperatura raggiunta dalla giunzione dei transistori è di circa 55°C per l'high side e 50°C per il low side, entrambe nettamente inferiori a quella massima dichiarata dal costruttore (150 °C).

## 4.2 Caratterizzazione DC

E' ben noto che i dispositivi di potenza a semiconduttore, in particolare di tipo *wide band-gap*, sono soggetti a fenomeni di degrado temporaneo. Lo stress elettrico può attivare difetti che rappresentano centri di intrappolamento della carica con tempi di rilascio relativamente brevi (da poche frazioni di secondo a qualche secondo). L'intrappolamento di carica, anche se temporaneo, si manifesta inevitabilmente con una variazione delle caratteristiche nominali ai terminali dei dispositivi. Lo scopo del presente studio è rilevare i fenomeni di degrado a lungo termine o non recuperabili. Per ovviare a misurazioni non significativi ai fini dello studio, si effettuano tre caratterizzazioni consecutive per ogni transistore, considerando valida solo la terza.

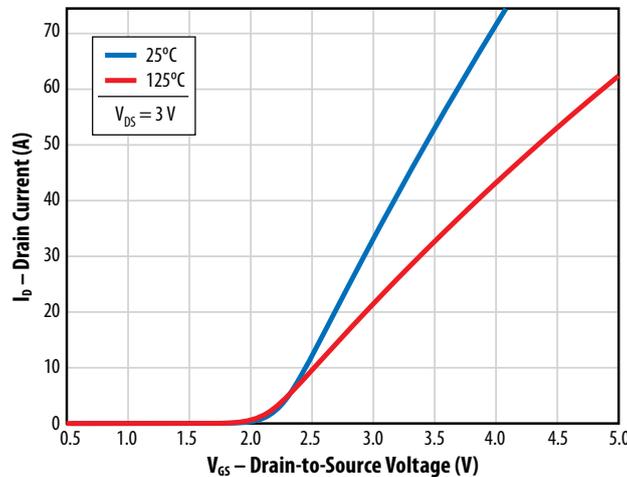


Figura 4.3: Caratteristica corrente di drain ( $I_D$ ) in funzione della tensione applicata tra gate e source ( $V_{GS}$ ) con  $V_{DS} = 3\text{ V}$  in scala lineare dei transistori GaN secondo quanto riportato dal costruttore EPC. Sono presenti le caratteristiche a temperature di 25 °C e di 125 °C.

A seguire è mostrato un esempio completo di utilizzo dello strumento virtuale di misura automatico per la rilevazioni di fenomeni di intrappolamento

di carica. Il test è stato eseguito ad un punto operativo del convertitore di 48 V per la tensione di ingresso e 4 A per la corrente di uscita. Prima di procedere in modalità convertitore è stata effettuato una caratterizzazione iniziale dei due transistori - riportata in Figura 4.4 e 4.7 - in modo da avere un riferimento dei dispositivi prima di applicare lo stress, in quanto le caratteristiche fornite dal costruttore hanno valori che vanno oltre il fondo scala degli strumenti a disposizione e per questo non possono essere presi in considerazione.

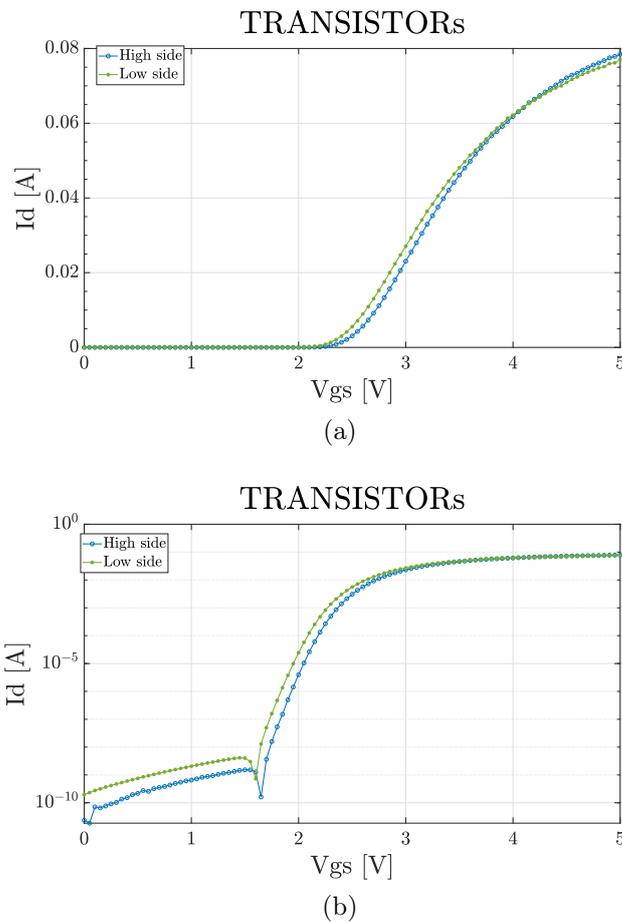
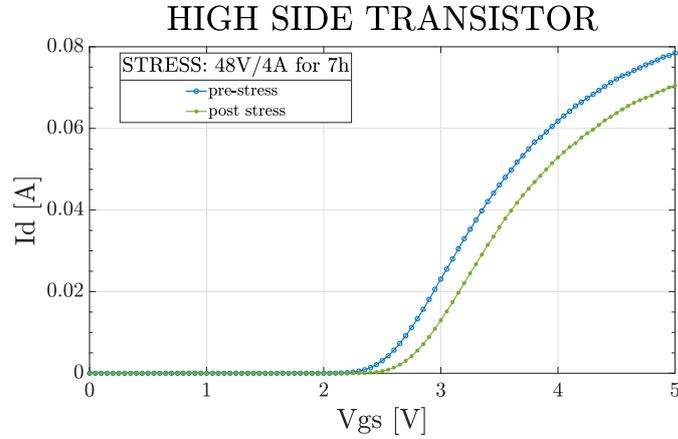


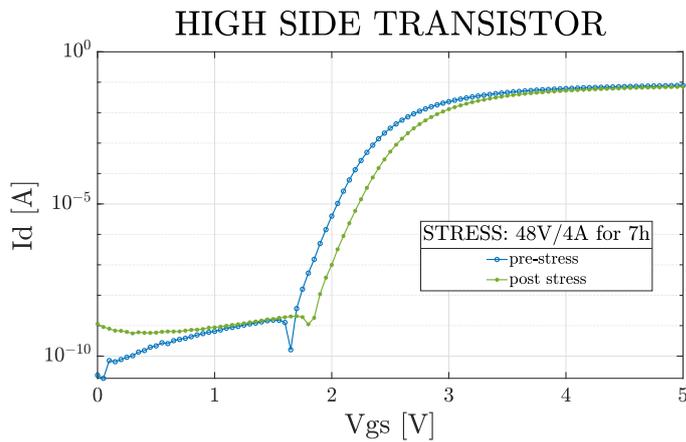
Figura 4.4: Caratteristica corrente di drain ( $I_D$ ) in funzione della tensione applicata tra gate e source ( $V_{GS}$ ) con  $V_{DS} = 1$  mV dei due transistori GaN (high side e low side) in scala lineare (a) e in scala logaritmica (asse corrente) (b).

La parte caratterizzazione dei due transistori di potenza è stata eseguita dopo un tempo di lavoro di 7 h a temperatura ambiente applicando una rampa di  $V_{GS}$  da 0 V a 5 V con incremento di 50 mV e  $V_{DS}$  fissata a 0.001 V.

Vengono riportate le caratteristiche DC  $I_D$ - $V_{GS}$  e  $I_D$ - $V_{GS}$  a  $V_{DS}$  fissata.



(a)



(b)

Figura 4.5: Caratteristica corrente di drain ( $I_D$ ) in funzione della tensione applicata tra gate e source ( $V_{GS}$ ) con  $V_{DS} = 1$  mV del transistore GaN high side in scala lineare (a) e in scala logaritmica (asse corrente) (b). Sono presenti le caratteristiche misurate prima e dopo il periodo di funzionamento da convertitore di 7 h con tensione d'ingresso di 48 V e corrente d'uscita di 4 A.

Si osserva in Figura 4.4 un andamento della curva assimilabile a quello teorico, con un valore di tensione di soglia  $V_{th}$  estrapolato paragonabile con quanto specificato dal costruttore (da datasheet: MIN 0.8 V, TYP 1.4 V, MAX 2.5 V). Il valore di corrente  $I_D$  non può essere confrontato in quanto viene applicato un diverso valore di tensione  $V_{DS}$ .

La caratterizzazione post stress si discosta leggermente da quella pre stress per entrambi i transistori: si riscontra un aumento della tensione di soglia di

circa 0.2 V e una diminuzione della corrente  $I_D$  di circa 10 mA. Questo effetto è con tutta probabilità dovuto ad intrappolamento con tempi di rilascio più lunghi rispetto a quelli intercorrenti tra caratterizzazioni consecutive. Si tratta comunque di fenomeni rilevabili anche con misura manuale effettuata con le SMU e quindi ancora una volta non attribuibili al banco automatico di misura. I risultati mostrano comunque un normale comportamento dei dispositivi, non evidenziando alcuna rottura o perdite anomale.

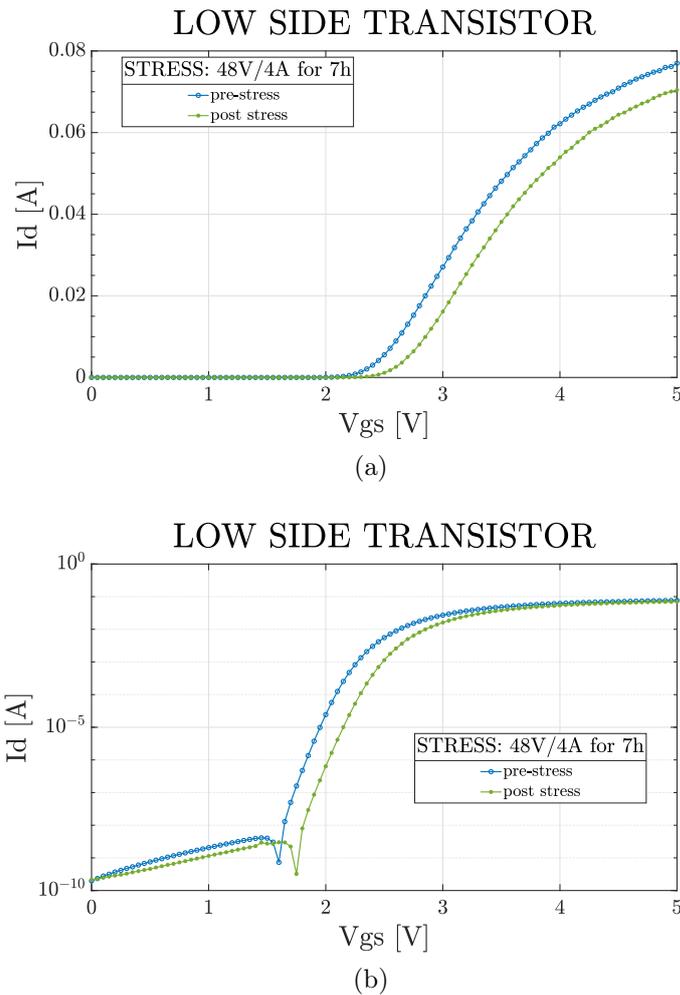


Figura 4.6: Caratteristica corrente di drain ( $I_D$ ) in funzione della tensione applicata tra gate e source ( $V_{GS}$ ) con  $V_{DS} = 1$  mV del transistor GaN low side in scala lineare (a) e in scala logaritmica (asse corrente) (b). Sono presenti le caratteristiche misurate prima e dopo il periodo di funzionamento da convertitore di 7 h con tensione d'ingresso di 48 V e corrente d'uscita di 4 A.

Riguardo la caratteristica  $I_G$ - $V_{GS}$ , le correnti di perdita del gate dei due

transistori non raggiungono valori elevati in nessuna situazione, restando al di sotto dei  $\mu\text{A}$ . In particolare, si possono osservare inizialmente migliori prestazioni del transistor high side - data la corrente più piccola in certi punti di quasi un ordine di grandezza - che variano leggermente dopo il tempo di funzionamento da convertitore. Il transistor low side evidenzia invece un comportamento molto stabile (curve pre e post stress quasi sovrapponibili). Mediamente i valori possono essere considerati in entrambi i casi validi. In generale, un aumento importante di intensità di corrente di gate (nell'ordine del mA anziché dei  $\mu\text{A}$ ) denota rottura irreversibile del dispositivo.

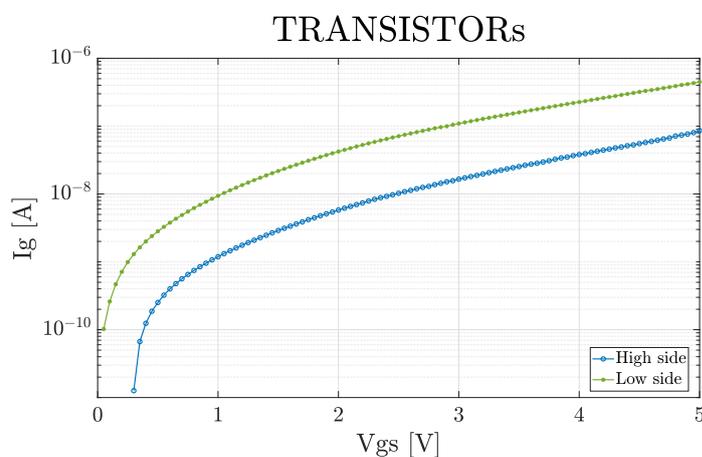


Figura 4.7: Caratteristica corrente di gate ( $I_G$ ) in funzione della tensione applicata tra gate e source ( $V_{GS}$ ) con  $V_{DS} = 1 \text{ mV}$  dei due transistori GaN (high side e low side) in scala logaritmica (asse corrente)

In conclusione, lo scopo delle prove effettuate - ovvero la validazione dello strumento e la conferma di un corretto ed efficiente comportamento del banco di misura automatico implementato - si può ritenere raggiunto sia in termini qualitativi che di specifiche soddisfatte. La caratterizzazione è stata eseguita correttamente, garantendo ripetibilità e precisione nella determinazione degli istanti di tempo in cui vengono effettuate le caratterizzazioni, senza provocare danni ai transistori e agli altri componenti del circuito.

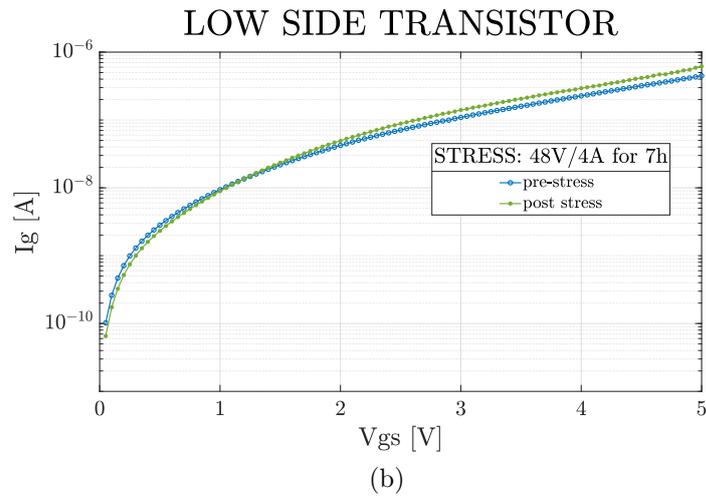
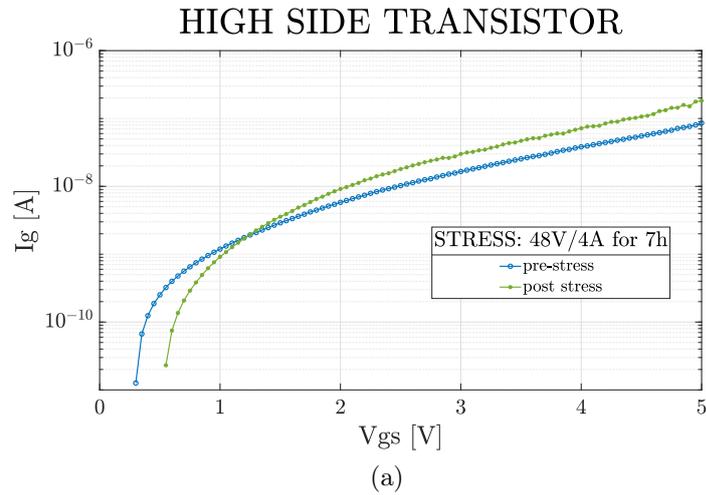


Figura 4.8: Caratteristica corrente di gate ( $I_G$ ) in funzione della tensione applicata tra gate e source ( $V_{GS}$ ) con  $V_{DS} = 1$  mV dei transistori GaN (high side e low side) in scala logaritmica (asse corrente). Sono presenti le caratteristiche misurate prima e dopo il periodo di funzionamento da convertitore di 7 h con tensione d'ingresso di 48 V e corrente d'uscita di 4 A.



# Capitolo 5

## Conclusioni

In questo elaborato di tesi è stato sviluppato uno strumento virtuale per rendere ripetibile ed automatico il processo di caratterizzazione in-situ di dispositivi di potenza, consentendo la gestione e la sincronizzazione di un banco di misura complesso in modo completamente automatico. Il sistema implementato permette di gestire simultaneamente tutti gli strumenti da banco necessari per lo studio di affidabilità a lungo termine, consentendo una completa caratterizzazione senza la necessità di dover riprogrammare le apparecchiature durante il processo. Il programma prevede in aggiunta un sistema di monitoraggio e gestione di situazioni di pericolo per l'operatore e di danneggiamento per il circuito di potenza. Attraverso i sistemi interni di protezione degli strumenti e la continua supervisione delle grandezze d'interesse, è possibile controllare sia l'intensità di corrente che le tensioni ai capi del circuito in modo da evitare che superino certe soglie stabilite. In particolare, lo strumento virtuale è stato predisposto per reagire opportunamente a tali problematiche, attuando una procedura di spegnimento di emergenza (attivabile anche manualmente per volontà dell'utente tramite apposito pulsante) che permetta una corretta e tempestiva chiusura delle sessioni aperte degli strumenti. In questo modo, è possibile prevenire eventuali danneggiamenti o rotture sia dei componenti del circuito di potenza, sia degli strumenti del banco di misura.

Lo strumento virtuale può essere adattato a diverse tipologie di prove mediante una configurazione opportuna dei parametri. È possibile effettuare uno studio sperimentale composto da più fasi di lavoro - potendo scegliere per ogni test variabili quali il punto di lavoro e il tempo di funzionamento - in cui si

possono valutare diverse figure di merito in base alle impostazioni scelte. La visualizzazione in tempo reale delle misure e del loro storico facilita inoltre il confronto fra diverse condizioni di stress applicate e diverse configurazioni del circuito di potenza.

Il sistema è stato poi validato su un convertitore di tipo buck sincrono costituito da transistori al GaN di tipo HEMT effettuando differenti tipologie di prove e confrontando le prestazioni rilevate con i valori attesi da valutazioni teoriche e le specifiche comunicate dal costruttore del dispositivo di potenza. I dati di simulazione confermano il corretto funzionamento del sistema, in particolare è stato valutato in prima battuta la corretta applicazione dei parametri impostati (configurazione degli strumenti, raggiungimento del valore desiderato di corrente e tensione, corretta temporizzazione tra i comandi per non incorrere in errori, ecc.) e successivamente l'acquisizione di caratteristiche DC e valori di efficienza attendibili.

Per quanto riguarda l'affidabilità a lungo termine, le prove effettuate rappresentano comunque un importante contributo per uno studio sperimentale più accurato sugli effetti di degradazione. Grazie alle potenzialità dello strumento, si prevede di effettuare delle prove in cui i dispositivi di potenza vengono sottoposti a condizioni di stress accelerato in laboratorio, consentendo, similmente a quanto avviene per le caratterizzazioni su wafer dei dispositivi, di ricavare importanti informazioni relative a processi di fabbricazione, scelte progettuali ed opzioni tecnologiche dei dispositivi di potenza.

# Bibliografia

- [1] N. Mohan, W. P. Robbins e T. M. Undeland. *Power Electronics: Converters, Applications and Design*. 3<sup>a</sup> ed. Wiley, 2003.
- [2] IEA. *Electricity Market Report - July 2021*. Paris, 2021. URL: <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-july-2021>.
- [3] C.-T. M. e Z.-H. G. «Review of GaN HEMT Applications in Power Converters over 500 W». In: *Electronics* (nov. 2019).
- [4] A. Lidow, M. de Rooij, J. Strydom et al. *GaN Transistors for Efficient Power Conversion*. 3<sup>a</sup> ed. Wiley, 2019.
- [5] P. J. Martínez, P. Miaja et al. «A Test Circuit for GaN HEMTs Dynamic  $R_{ON}$  Characterization in Power Electronics Applications». In: *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 7.3 (2019), pp. 1456–1464.
- [6] K. Li, P.L. Evans e C.M. Johnsonand. «Characterisation and Modelling of Gallium Nitride Power Semiconductor Devices Dynamic On-State Resistance». In: *IEEE Transactions on Power Electronics* 33.6 (2018), pp. 5262–5273.
- [15] M. Ebli, M. Wattenberg e M. Pfof. «Performance of a GaN-HEMT synchronous boost converter in ZVS and hard switching mode». In: *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*. 2016, pp. 1–8.

## Datasheet e Users Manual

- [7] ITECH. *IT6500 Series Wide-range High-power DC Power Supply*. Datasheet. URL: <https://www.itech.sh/en/product/dc-power-supply/IT6500.html>.
- [8] ITECH. *IT8900A/E High Performance High Power DC Electronic Load*. Datasheet. URL: <https://www.itech.sh/en/product/dc-electronic-load/IT8900A.html>.
- [9] FLUKE. *PM5139 Function Generator 0.1mHz - 20 MHz*. Users Manual. URL: [https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/PM5139\\_umeng0200.pdf](https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/PM5139_umeng0200.pdf).
- [10] FLUKE. *FLUKE 45 Dual Display Multimeter*. Datasheet. URL: <http://www.smart-inc.com.tw/uploads/root/fluke45.pdf>.
- [11] TDK Electronics. *Temperature protection device Chip NTC thermistor NTCG series*. Datasheet. 2020. URL: [https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/sensor/ntc/chip-ntc-thermistor/catalog/tpd\\_automotive\\_ntc-thermistor\\_ntcg\\_en.pdf](https://product.tdk.com/system/files/dam/doc/product/sensor/ntc/chip-ntc-thermistor/catalog/tpd_automotive_ntc-thermistor_ntcg_en.pdf).
- [12] Keithley Instruments. *2600B System SourceMeter SMU Instruments*. Datasheet. 2021. URL: [https://download.tek.com/datasheet/1KW-60906-1\\_Series\\_2600B\\_SMU\\_Datasheet\\_030321.pdf](https://download.tek.com/datasheet/1KW-60906-1_Series_2600B_SMU_Datasheet_030321.pdf).
- [13] Keithley Instruments. *Model 2600-TRIAx SMU Connector*. Users Manual. Rev. A. 2005. URL: [https://download.tek.com/datasheet/PA-916\(A-Jun2005\)\(Model2600\)1\\_1.pdf](https://download.tek.com/datasheet/PA-916(A-Jun2005)(Model2600)1_1.pdf).
- [14] EPC. *EPC2052 – Enhancement Mode Power Transistor*. Datasheet. 2020. URL: [https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/datasheets/EPC2052\\_datasheet.pdf](https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/datasheets/EPC2052_datasheet.pdf).