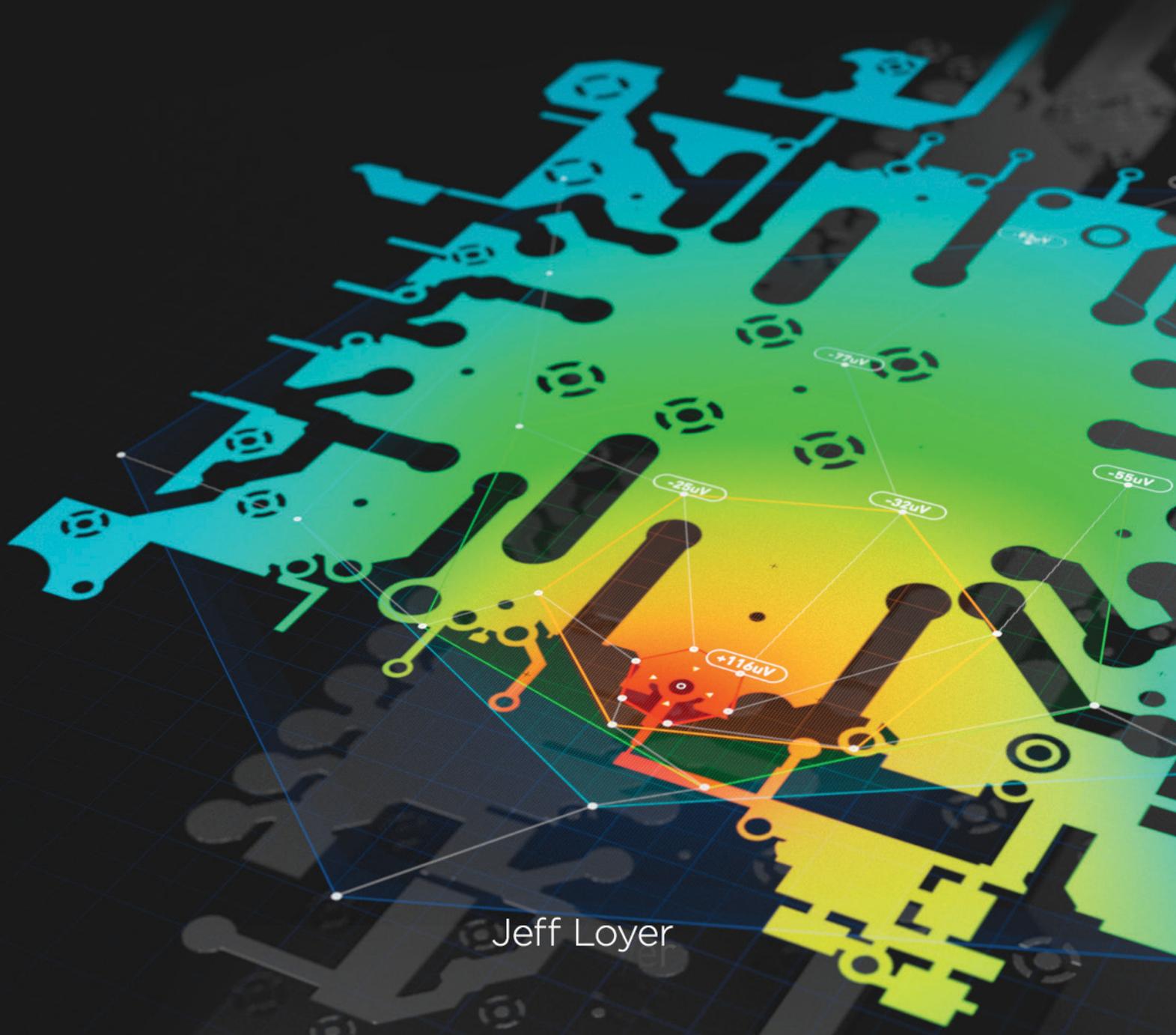


Altium[®]

Analisi in corrente continua di una PDN: Uno strumento essenziale per il progettista digitale



Jeff Loyer

ANALISI IN CORRENTE CONTINUA DI UNA PDN: UNO STRUMENTO ESSENZIALE PER IL PROGETTISTA DIGITALE

INTRODUZIONE

L'analisi in corrente continua di una rete di distribuzione dell'alimentazione ("PDN"), detta anche "calo IR", "integrità dell'alimentazione in corrente continua" o "analisi PI-DC", risponde ad alcune domande fondamentali che ogni progettista digitale (o analogico) dovrebbe farsi:

- Ho inserito una quantità di metallo sufficiente tra le sorgenti e i carichi, in modo che la tensione di ogni carico sia adeguata?
 - Il numero di modelli dedicati all'alimentazione e alla messa a terra sono sufficienti?
 - Il numero e le dimensioni delle vias sono sufficienti?
- Posso ottimizzare in modo intelligente i miei modelli PDN?
- Quali parti del mio circuito rischiano maggiormente di surriscaldarsi o fondersi?
- Ho commesso degli errori nella progettazione sui modelli dedicati alla messa a terra?

Molti progettisti digitali sono consapevoli della necessità di un'accurata analisi d'integrità dei segnali, o quanto sia essenziale comprendere gli aspetti legati alla corrente alternata della loro PDN (ad esempio "Di quanti condensatori di disaccoppiamento ho bisogno?"), ma non danno la giusta importanza alle loro analisi della PDN relative alla corrente continua ("PI-DC"). Tuttavia, anche l'analisi PI-DC è fondamentale, poiché può dare indicazioni importanti sulla qualità di un progetto e permettere un risparmio di spazio e strati preziosi, così da garantire una progettazione digitale economicamente vantaggiosa. La domanda fondamentale a cui quest'analisi risponde è relativamente semplice: – "Tra la mia sorgente di alimentazione e tutti i carichi, ho inserito una quantità di metallo sufficiente (nel nostro caso, quasi esclusivamente rame) a fornire un'alimentazione adeguata per quei carichi?" Nella moderna progettazione di circuiti integrati con piccole dimensioni, rispondere accuratamente a questa domanda fa la differenza tra il successo e il fallimento.

Fino a poco tempo fa, la progettazione digitale era dominata da enormi fattori – ad esempio PC desktop e server di grandi dimensioni. In questi progetti, interi strati di metallo potevano essere dedicati alla distribuzione dell'alimentazione, garantendo cali di potenza minimi tra la sorgente e i carichi. Era possibile utilizzare regole empiriche basate sulla prudenza per stimare la quantità di metallo necessaria, con conseguenze minime se la superficie dedicata alla distribuzione dell'alimentazione era più del necessario. Un progettista digitale doveva solo assicurarsi che la distribuzione dell'alimentazione in corrente continua fosse "adeguata", senza preoccuparsi di ottimizzarne i modelli, per ridurre al minimo l'area e gli strati.

Quei giorni sono finiti: – oggi anche i progetti per i circuiti dei server sono diventati estremamente densi e lo spazio sulle schede è una risorsa preziosa che non può essere sacrificata rispetto alle pratiche di progettazione conservativa. Oggi tutto il metallo dedicato alla distribuzione dell'alimentazione deve essere "necessario". Non possiamo permetterci il lusso di strati aggiuntivi o di schede di dimensioni maggiori. L'analisi PI-DC fornisce dei mezzi sofisticati per garantire che il metallo dedicato alla distribuzione dell'alimentazione non sia solamente adeguato, ma necessario.

DATI FORNITI DALLO STRUMENTO PI-DC

Il primo dato che uno strumento PI-DC fornisce è il calo di tensione dalla sorgente ai carichi, dovuto alla resistività della rete elettrica. Non è più possibile presupporre che sia zero a causa di un "piano" dedicato all'alimentazione infinitamente grande. Poiché lo spazio disponibile per il progetto si riduce, il concetto di "piano" dedicato all'alimentazione potrebbe non essere più pertinente. Sebbene sia possibile avere un layer dedicato principalmente alla distribuzione dell'alimentazione, tale layer sarà probabilmente suddiviso in diverse sezioni (reti) che erogano valori di tensione unici alle diverse parti del progetto. L'analisi PI-DC ci avvisa sulla quantità del calo di tensione per ogni rete, permettendoci quindi di allocare il giusto spazio a ogni rete di tensione. La **Figura 1** mostra un tipico diagramma di tensione 3D per un modello di alimentazione da 1,8 V dalla sorgente (U4, VRM) al carico (U1, FPGA), raffigurato assieme al percorso a 2 strati (le vias non sono visualizzate in questa visualizzazione). Un esame attento del diagramma di tensione mostra:

ANALISI IN CORRENTE CONTINUA DI UNA PDN: UNO STRUMENTO ESSENZIALE PER IL PROGETTISTA DIGITALE

- Solamente 10 mV di calo tensione tra U4 (1,7 V è stato calcolato con un declassamento del 5% rispetto agli 1,8 V nominali) e U1 (1,69 V).
- La traccia singola da U4 all'anello di tensione FPGA è la sorgente maggiore di calo di tensione.
- Vi sono dei cali di tensione dovuti ad alcune vias – il colore della rete, nella parte superiore delle vias, è diverso rispetto a quello della parte inferiore.
- Come previsto, non vi è alcun calo di tensione in corrente continua tra la sorgente e il condensatore di disaccoppiamento C3. Per l'analisi in corrente continua i condensatori sono considerati "aperti".

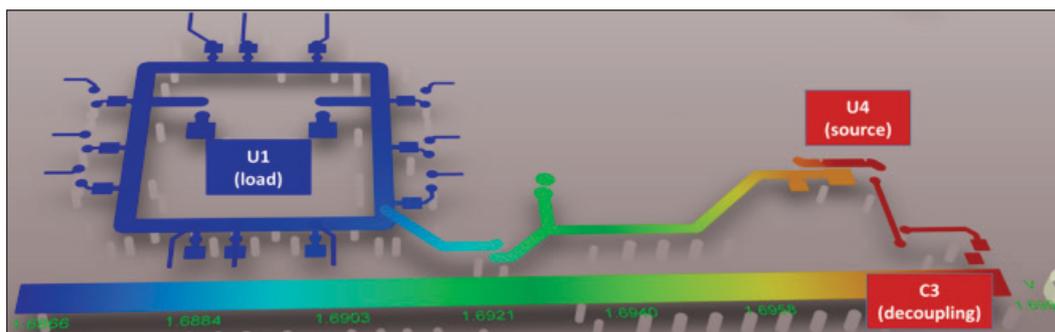


Figura 1: Grafico di tensione dalla sorgente di alimentazione (U4) al singolo carico (U1, un FPGA)

Uno strumento PI-DC riporta anche le densità di corrente ("J") all'interno dei modelli interessati, permettendo al progettista, se necessario, di focalizzarsi sulle eventuali correzioni delle aree con la maggiore densità di corrente ("punti critici" con J_{max}). Notare come questo grafico confermi ciò che avevamo concluso osservando il grafico della tensione, mostrando alcune cose in modo più diretto e permettendoci alcune considerazioni. Sfortunatamente non è solitamente possibile impostare un singolo valore limite per la densità di corrente, per cui spesso si utilizzano solo dei valori relativi. Le prestazioni termiche dipenderanno non solo dalla densità di corrente ma anche dalla dissipazione termica del sistema e dalla sezione trasversale del modello, come dimostrato da Doug Brooks e Johannes Adam nel loro articolo "Trace Currents and Temperatures Revisited" (Doug Brooks, n.d.).

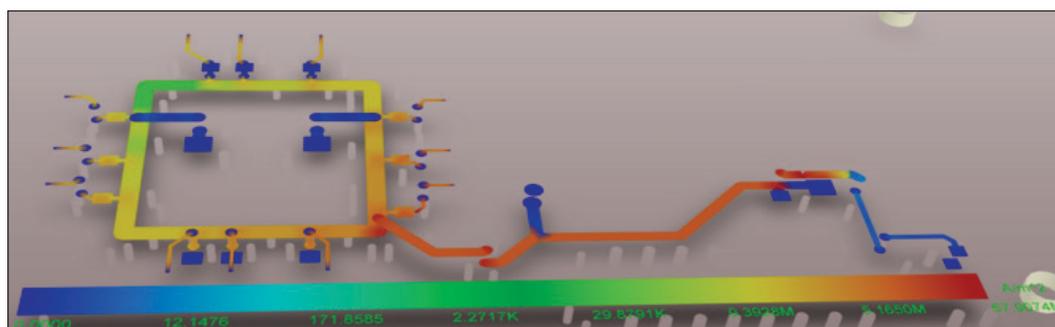


Figura 2: Grafico della densità di corrente della rete di alimentazione tra la sorgente di alimentazione (U4) e il singolo carico (U1, un FPGA)

Senza uno strumento PI-DC, il progettista utilizzerà probabilmente delle regole convenzionali, che implicano una determinata larghezza, basata sulla corrente trasportata dai modelli dedicati alla distribuzione dell'alimentazione. Esistono almeno due problemi utilizzando questo approccio:

- 1) L'uso di una stessa larghezza minima, indipendentemente dalla distanza tra la sorgente e i carichi, spesso non ha senso – per esempio, non utilizziamo uno stesso cavo per una prolunga di 2 metri e una di 30 m.
- 2) Utilizzando la stessa larghezza per l'intera lunghezza del modello, da un lato si spreca dello spazio sulla scheda, dall'altro non si rappresenta il progetto più efficiente per il modello dedicato alla distribuzione dell'alimentazione.

ANALISI IN CORRENTE CONTINUA DI UNA PDN: UNO STRUMENTO ESSENZIALE PER IL PROGETTISTA DIGITALE

I risultati ottenuti da uno strumento PI-DC consentono al progettista di dimensionare correttamente il modello dedicato alla distribuzione dell'alimentazione basato sulla lunghezza e, dove necessario, permettono da un lato di restringere la forma per le brevi distanze, mentre dall'altro consentono di allargare il modello nei punti in cui è disponibile più spazio. Uno strumento PI-DC è fondamentale per determinare la forma ottimale delle reti di distribuzione dell'alimentazione.

Inoltre, oggi, anche i modelli dedicati alla messa a terra non possono più essere considerati infiniti. – I progetti odierni impongono solitamente dei limiti sulla superficie allocabile alla messa a terra. Tali limitazioni sull'area di messa a terra possono causare significative tensioni di "messa a terra", per cui non possiamo più presupporre che siano zero. Il problema dato dalla tensione di messa a terra è più complesso rispetto a quello delle reti di alimentazione – la tensione reale su qualsiasi punto della rete di messa a terra sarà una sovrapposizione delle tensioni indotte dalle correnti provenienti dalle diverse reti di alimentazione. Ad esempio, un progetto potrebbe avere sia tensioni di 1,8 V che di 3,3 V, fornite a un dispositivo. Sebbene le tensioni sulle due reti di alimentazione siano teoricamente indipendenti, il dispositivo registrerà una tensione sui pin di messa a terra che è pari alla somma delle tensioni indotte dalle correnti di 1,8 V e 3,3 V. È essenziale comprendere e modellare accuratamente questa relazione. La buona notizia è che, per la corrente continua, la sovrapposizione è abbastanza immediata ed è sufficiente fare una semplice addizione (o una sottrazione, nel caso di polarità opposte). Tuttavia, il progettista deve considerare che la dimensione del modello dedicato alla messa a terra, in un qualsiasi punto, deve poter ricevere correnti da più sorgenti, mentre il calcolo per le dimensioni dei modelli dedicati all'alimentazione è più immediato.

Uno strumento PI-DC deve essere in grado di fornire la tensione in corrente continua a un dispositivo, utilizzando la tensione di messa a terra del dispositivo come tensione di riferimento. La tensione relativa a un punto di "messa a terra" arbitrario (come la sorgente di tensione) è spesso priva di significato. Le correnti nei modelli dedicati alla messa a terra possono indurre una tensione significativa sulla rete di messa a terra. Questo fenomeno deve essere previsto nell'analisi in corrente continua della rete di distribuzione dell'alimentazione.

Uno strumento PI-DC fornisce inoltre preziose informazioni sul numero di vias necessarie per la distribuzione dell'alimentazione e sulle dimensioni che devono avere. Sebbene questo sembri un esercizio banale, le vias di alimentazione occupano solitamente una quantità di spazio prezioso su tutti gli strati, bloccando il percorso sugli strati situati al di sopra e al di sotto degli strati dedicati alla loro alimentazione. L'uso di un numero elevato di vias o l'uso di vias troppo grandi è un lusso che i progetti di oggi non possono permettersi. Paradossalmente, se si fanno scelte eccessivamente conservative, in termini di allocazione delle vias dedicate alla distribuzione dell'alimentazione, si corre il rischio che le vias possano perforare un altro piano di alimentazione o di messa a terra, causando più problemi al progetto di quelli che risolvono.

COMPRESIONE DEGLI EFFETTI TERMICI

Una cosa che la maggior parte degli strumenti PI-DC non fornisce direttamente sono gli effetti termici della corrente, – ovvero il dato su quanto si riscalda il metallo. Questo fattore può essere critico, visto il rapporto I^2R tra corrente e alimentazione – anche una piccola resistenza può dissipare grandi quantità di energia se la corrente è elevata, causando punti caldi localizzati e conseguenti guasti dei materiali dielettrici o dei conduttori. Tuttavia, gli strumenti PI-DC forniscono informazioni sulla densità di corrente di alimentazione e sui modelli dedicati alla messa a terra, consentendo ai progettisti di ottimizzare il progetto, al fine di avere una bassa densità di corrente e quindi una minore dissipazione di potenza.

La specifica IPC 2152 (precedentemente 2221) offre indicazioni per evitare problemi, fornendo le larghezze minime delle tracce per un aumento di temperatura accettabile. I progettisti PCB spesso ne fanno un uso improprio, inserendo valori di aumento di temperatura molto prudenti (ad esempio 1°C), utilizzando poi la corrispondente larghezza della traccia come larghezza minima per l'intero modello PDN, dalla sorgente a tutti i carichi. L'applicazione della specifica, in questo modo, costringe il progettista a destinare un'area maggiore del necessario alla distribuzione dell'alimentazione, consumando spazio prezioso o rendendo necessario l'uso di più strati per il progetto. Al fine di creare la più efficiente distribuzione dell'alimentazione di progettazione possibile, la specifica IPC-2152 deve essere compresa appieno e non applicata alla cieca. Applicando le specifiche in maniera più accurata, il progettista, oltre a sfruttare le informazioni fornite da uno strumento PI-DC, può ridurre l'area della PDN e contemporaneamente realizzare un progetto sicuro.

ANALISI IN CORRENTE CONTINUA DI UNA PDN: UNO STRUMENTO ESSENZIALE PER IL PROGETTISTA DIGITALE

Nell'applicare la specifica IPC-2152, invece di utilizzare un valore di aumento di temperatura arbitrariamente basso, il progettista digitale dovrebbe utilizzare un valore che rappresenti un aumento di temperatura che il materiale dielettrico e il metallo possano sopportare senza rischiare danni o guasti. Ad esempio, la **Figura 3** dimostra che un aumento di temperatura di 45°C invece di 1°C consente al progettista di ridurre la larghezza minima della traccia da 0,3 pollici (7,6 mm in rosso) a soli 0,02 pollici (0,5 mm in blu) per una corrente di 2 A su uno strato di rame da 28 g. Uno strumento PI-DC può quindi essere utilizzato per essere certi che i requisiti di tensione di tutti i carichi siano soddisfatti quando si utilizza tale larghezza minima.

Sfortunatamente, il problema termico è molto complesso e anche uno strumento di simulazione termica potrebbe fornire solo una visione limitata, a causa di tale complessità¹. Una risposta accurata richiede modelli accurati, per la miriade di componenti che contribuiscono alle prestazioni termiche del sistema, come ad esempio il materiale del PCB, il numero di strati, la densità del rame, la generazione e la dissipazione del calore dei vari componenti, il flusso d'aria circostante, le condizioni ambientali ecc. Un progettista digitale sarà generalmente costretto a fare scelte prudenti, ma deve considerare alcuni aspetti critici per gli effetti termici:

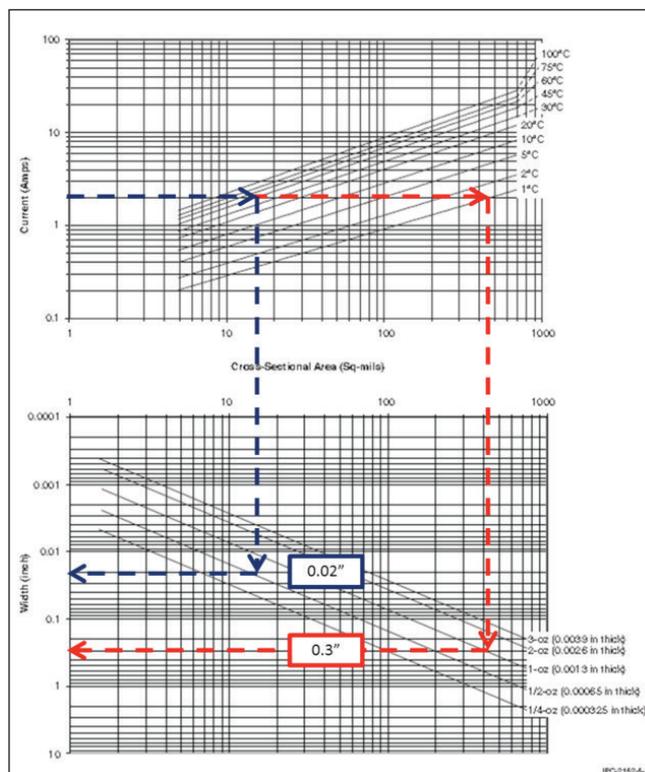


Figura 3: Riduzione della larghezza della traccia da 0,3 pollici (7,6 mm) a 0,02 pollici (0,5 mm) utilizzando la specifica IPC-2152

- Non tutti i progetti sono termicamente equivalenti. Un circuito progettato per un ambiente fresco con componenti a bassa alimentazione dovrebbe richiedere meno requisiti in termini di effetti termici rispetto a un circuito che consuma un livello di alimentazione elevato in un ambiente molto caldo, per esempio.
- Non tutte le aree del progetto sono termicamente equivalenti. Occorre fare particolare attenzione alle aree con minore dissipazione di calore, – come ad esempio gli strati esterni e le aree situate sotto o vicino a componenti molto caldi. Le aree lontane dai componenti caldi saranno in genere meno soggette a effetti termici, poiché l'alimentazione viene dissipata in modo più efficiente. L'alimentazione di un dispositivo che consuma molta energia, con collegamenti corti all'interno della sua struttura, rappresenta la ricetta perfetta per un disastro.
- Di quanto aumenta la densità di corrente? L'aumento di temperatura dipende dall'alimentazione consumata dal modello, ed è proporzionale all' IR^2 . Occorre prestare particolare attenzione ai diagrammi di densità di corrente e aggiungere strutture di rame dove la densità di corrente è massima. Come detto in precedenza, è probabile che non sia possibile impostare un limite di "densità di corrente massima", poiché gli effetti termici dipendono da molti altri fattori. Tuttavia l'analisi PI-DC consente al progettista di individuare le aree potenzialmente più problematiche e valutare la relativa "non correttezza" delle aree del circuito.
- Il modello in questione è uno strato esterno o interno? I dati della specifica IPC-2152 indicano che gli strati interni (stripline) dissipano il calore più facilmente degli strati microstrip (anche se questo può dipendere dal flusso d'aria sulla traccia, che aumenta il raffreddamento per convezione – possono comunque esistere tracce microstrip con una buona dissipazione di calore).
- I requisiti termici dipendono molto dal materiale usato. I PCB flessibili (in particolare quelli che sono attivamente flessibili) sono solitamente meno tolleranti alle alte temperature rispetto ai PCB rigidi.
- Nelle vicinanze sono presenti dei componenti in rame relativamente freddi, in grado di dissipare il calore meglio dei materiali dielettrici?

ANALISI IN CORRENTE CONTINUA DI UNA PDN: UNO STRUMENTO ESSENZIALE PER IL PROGETTISTA DIGITALE

COME EVITARE IL FENOMENO GIGO (“GARBAGE IN, GARBAGE OUT”) NELL’ANALISI PI-DC

Naturalmente, per essere adeguato, lo strumento PI-DC deve fornire risultati accurati. L'accuratezza dello strumento non dipende solo dal sofisticato motore di modellazione 2D o 3D utilizzato, ma anche dai presupposti inseriti nella simulazione. È fondamentale che chiunque utilizzi questi strumenti conosca i presupposti critici e i parametri inseriti nello strumento.

Il primo parametro da immettere "correttamente" è la conducibilità del metallo utilizzato nel progetto. Anche se sembra una cosa semplice, richiede in realtà molto più impegno di quanto comunemente si creda. La maggior parte degli strumenti di verifica dell'integrità dell'alimentazione e del segnale, ad esempio, presuppongono che il metallo usato per i circuiti stampati (PCB) sia "rame", con una conducibilità di 5,88e7S/m. I dati industriali^{2,3} indicano, tuttavia, che il "rame" elettro-depositato, utilizzato nei PCB, è significativamente meno conduttivo del rame puro, con un valore pari a solo 4,7e7S/m a 25°C. Se i risultati di validazione e simulazione differiscono, è necessario verificare la conducibilità del metallo.

Tale conducibilità deve essere modificata anche in base all'effettiva temperatura di operatività del progetto. La conducibilità del rame, ad esempio, diminuisce dello 0,4% per ogni grado centigrado. Un circuito in rame che opera a temperature di 125°C è il 40% meno conduttivo rispetto al suo uso a 25°C. Questa differenza deve essere calcolata nella simulazione – non serve a nulla avere un motore di simulazione altamente sofisticato, se viene utilizzato per simulazioni basate su presupposti errati. (Nota: Per circuiti operativi in ambienti con temperature estremamente basse o alte, anche la linearità del coefficiente di temperatura, 0,4% per ogni °C, deve essere valutata in base agli intervalli previsti).

Un altro presupposto fondamentale, che spesso viene considerato in modo "errato", è la dimensione delle vias. Molti strumenti di progettazione PCB utilizzano un unico valore per rappresentare la dimensione di una particolare via e ciò che rappresenta esattamente quel valore è ambiguo. Le vias vengono di solito considerate come delle colonne solide, ma non è sempre così – alcune potrebbero non essere riempite, ed essere quindi poco profonde, con un diametro interno ed esterno (I.D. e O.D., rispettivamente). La sezione trasversale effettiva delle vias dipende da entrambe le dimensioni – un grande ma poco profondo cilindro può avere una sezione trasversale minore, rispetto a un cilindro più piccolo ma pieno. Per le vias utilizzate tipicamente per la distribuzione dell'alimentazione, molti pensano che, se viene dato un solo valore per la via, quel valore rappresenti la dimensione del foro (diametro esterno). Si presuppone, quindi, che la via sia completamente piena, o meglio ancora che sia rappresentata idealmente da una colonna solida. Questo presupposto potrebbe non essere valido, fornendo un risultato errato.

Per capire esattamente come modellare le vias in modo corretto, l'utente deve sapere come sono state specificate le dimensioni delle vias e come apparirà l'effettiva implementazione di tali specifiche (quale aspetto avrà la via quando sarà sezionata trasversalmente). Molti strumenti non consentono all'utente di fornire sia un diametro interno che uno esterno, e permettono quindi di definire soltanto delle vias solide. Se è questo il caso e nell'implementazione reale le vias saranno poco profonde, è necessario modificare il diametro esterno delle vias, per rappresentare l'area corretta della sezione trasversale. Fortunatamente, trovare il diametro giusto per una colonna solida, che ha la stessa sezione trasversale di una colonna poco profonda dotata di diametro esterno e interno (O.D. e I.D.), è un banale esercizio matematico – è la semplice differenza tra diametro esterno e interno (O.D. e I.D.). La difficoltà consiste nel ridimensionare le vias correttamente quando si esegue la simulazione, senza conseguenze indesiderate nella progettazione fisica.

Se per la distribuzione dell'alimentazione si utilizzano gli strati esterni del PCB, questi rappresentano un elemento particolarmente difficile da modellare. Lo spessore del rame sugli strati esterni del PCB dipende dallo spessore di placcatura, e questo parametro può variare significativamente a seconda delle parti della scheda. Bisogna assicurarsi di misurare lo spessore degli strati esterni, se questi sono utilizzati per la distribuzione dell'alimentazione e i risultati di simulazione non corrispondono alle misurazioni di laboratorio.

¹Doug Brooks, Johannes Adam. *Articoli sulla corrente, temperatura, alimentazione e resistenza della traccia*. Tratto da UltraCAD: http://ultracadm.com/article_temperature.htm

²Loyer, Kunze, Burkhardt. *Accurate Insertion Loss and Impedance Modeling of PCB Traces*. DesignCon 2013. San Jose, CA.

³Loyer, Kunze. *Humidity and Temperature Effects on PCB Insertion Loss*. DesignCon 2013. San Jose, CA.

ANALISI IN CORRENTE CONTINUA DI UNA PDN: UNO STRUMENTO ESSENZIALE PER IL PROGETTISTA DIGITALE

Infine, rappresentare correttamente i carichi sembra un lavoro semplice, ma non lo è. Un progettista potrebbe presumere che, per un carico passivo, come una resistenza o un diodo, sia meglio modellare il carico come una resistenza e i componenti attivi, come gli FPGA, dovrebbero essere modellati come dissipatori di corrente. Quando si modellano i componenti attivi come dissipatori di corrente, tuttavia, si potrebbe essere tentati di utilizzare la corrente massima (I_{max}) come corrente assorbita. Quando si eseguono simulazioni PI-DC per misurare il calo di tensione della PDN, tale prassi è difficile da giustificare e potrebbe portare a risultati eccessivamente pessimistici. L'assorbimento massimo di corrente si verificherà probabilmente solo quando viene applicata la tensione massima (V_{max}). In genere eseguiamo le simulazioni ai limiti inferiori dell'intervallo di tensione e l'assorbimento di corrente dovrebbe riflettere tale scelta per ottenere risultati di simulazione accurati. Un modello più ragionevole per un carico attivo utilizzato per le simulazioni dei cali di tensione potrebbe invece essere un resistore, il cui valore è la funzione della tensione e dalla corrente nominale del dispositivo, (V_{nom}/I_{nom}). In situazioni opposte, invece, alcuni progettisti potrebbero avere dei valori massimi di densità di corrente che vorrebbero evitare, per considerazioni termiche (invece di avere livelli minimi di tensione per considerazioni elettriche). Per l'analisi PI-DC (per considerazioni termiche) nelle simulazioni di densità di corrente massima, potrebbe essere consigliabile utilizzare la tensione massima (V_{max}) per le sorgenti, la resistenza minima (R_{min}) per i carichi passivi e la corrente massima (I_{max}) per i carichi attivi. In questo modo si ottiene una rappresentazione più accurata delle possibili correnti massime.

Quando si utilizza uno strumento PI-DC, è fondamentale comprendere tutti i presupposti inerenti alla simulazione e verificare che siano accurati. In caso contrario, i risultati potrebbero non avere senso.

CONVALIDA DEI RISULTATI

È fondamentale che ogni progetto sia adeguatamente convalidato, per garantire l'accuratezza della simulazione e dei parametri immessi. Fortunatamente, questa operazione è abbastanza semplice in un'analisi PI-DC. La tensione di ogni carico può essere misurata facilmente, anche utilizzando come riferimento una messa a terra locale. Probabilmente, gli aspetti più impegnativi sono: 1) trovare un modo per essere certi che tutti i carichi utilizzino il massimo livello di potenza quando si eseguono le misurazioni, per i casi in cui la tensione del modello dedicato alla messa a terra possa essere un fattore significativo; 2) comprendere correttamente gli effetti termici sulla resistività. La sovrapposizione potrebbe essere necessaria se l'esercizio simultaneo di tutti i carichi ai loro limiti non fosse funzionale. In questo caso, la difficoltà consisterà nel misurare la tensione di "messa a terra" per ogni carico, relativa allo stesso valore di riferimento utilizzato nelle simulazioni. Per l'aspetto termico, sarà necessario avere un'idea della temperatura effettiva dei modelli di alimentazione, al fine di calcolare la corretta conducibilità del metallo, che varia in funzione della temperatura. Questo richiede una strumentazione che non si trova solitamente nei laboratori di verifica, come le termocoppie, i termometri o i sensori di temperatura a raggi infrarossi.

Se le tensioni misurate non corrispondono alle simulazioni, ciascuno dei presupposti e dei risultati della simulazione deve essere verificato. Abbiamo cercato di fornire sufficienti informazioni su come essere certi che i presupposti siano corretti, ma come verificare i risultati? Il dato fondamentale che è necessario immettere correttamente in uno strumento PI-DC è la resistenza tra la sorgente e i carichi, e questa informazione, di solito, non viene fornita direttamente. È tuttavia abbastanza facile costruire un circuito di prova che fornisca un valore da confrontare con la misurazione ottenuta con un ohmmetro su un progetto essenziale. Se la sorgente è modellata come una batteria da 0 V e un carico è modellato come un assorbimento di corrente pari a 1 A, la tensione a livello del carico rappresenta direttamente la resistenza tra la sorgente e il carico (ignorando il segno della tensione). L'esempio in basso (**Figura 4**), mostra i risultati nel determinare il valore di resistenza tra la sorgente (U4 pin 2 per l'alimentazione, J1 pin 2 e 3 per la messa a terra) e il carico (U1) utilizzando un simulatore PI-DC.

ANALISI IN CORRENTE CONTINUA DI UNA PDN: UNO STRUMENTO ESSENZIALE PER IL PROGETTISTA DIGITALE

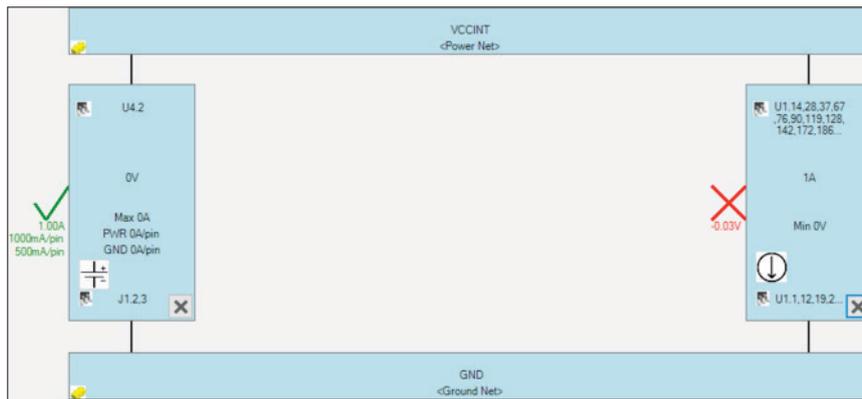


Figura 4: Impostazione dell'analisi PI-DC per la misurazione della resistenza (1 V = 1 Ω)

I risultati indicano una resistenza di 30 mΩ nella PDN per U1 (notare il valore di 30 mV in U1 nella **Figura 4**, mostrata come “-0,03 V”). Per verificare questo dato in laboratorio, si dovrebbe posizionare un "cortocircuito" da 0 ohm tra il pin 2 dell'unità U4 e i pin 2 e 3 dell'unità J1 (ad esempio un grande elemento di metallo), e misurare la resistenza tra i pin di alimentazione e di messa a terra dell'unità U1. Una lettura diversa da 30 mΩ indica un errore nella simulazione (per misurare queste basse resistenze, potrebbe essere necessario utilizzare tecniche speciali come il rilevamento a 4 terminali).

Se è necessario distinguere tra la resistenza dell'alimentazione e quella dei piani di messa a terra, è possibile farlo analizzando la tensione su ciascun elemento di questo circuito di prova. In **Figura 5** si può notare un valore di 27 mΩ sul modello dedicato all'alimentazione (il colore blu scuro rappresenta 27 mV = 27 mΩ), mentre in **Figura 6** è presente un valore di 3 mΩ sul modello dedicato alla messa a terra (rappresentata in rosso).

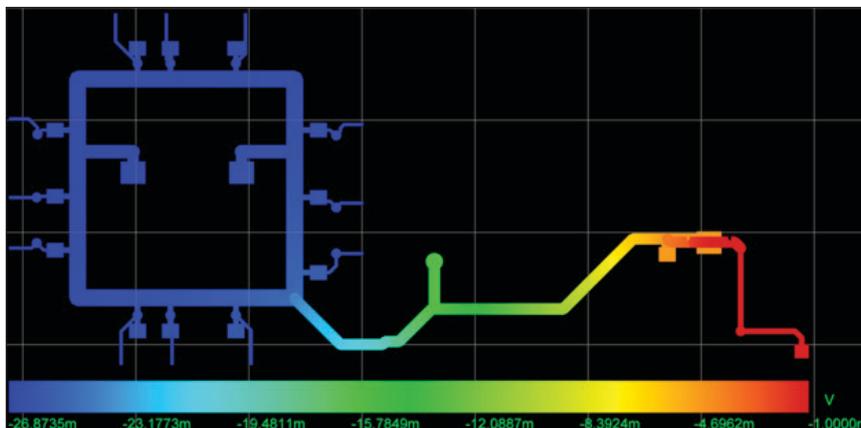


Figura 5: Risultati di misurazione della resistenza nel grafico della tensione di un modello dedicato all'alimentazione (1 V = 1 Ω)

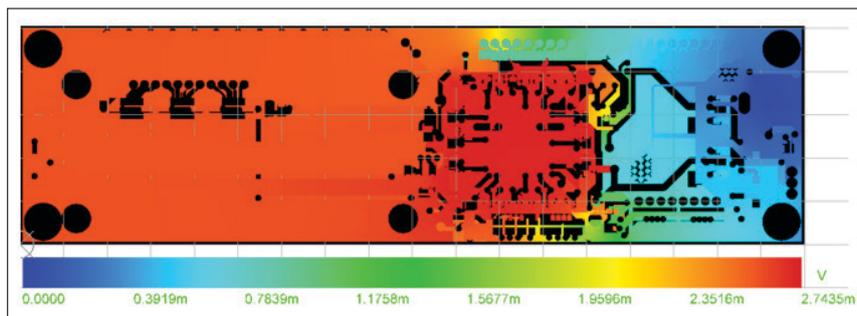


Figura 6: Risultati di misurazione della resistenza nel grafico della tensione di un modello dedicato alla messa a terra (1 V = 1 Ω)

ANALISI IN CORRENTE CONTINUA DI UNA PDN: UNO STRUMENTO ESSENZIALE PER IL PROGETTISTA DIGITALE

Un fattore critico da prendere in considerazione durante la verifica è la differenza di resistività dovuta alla temperatura. La resistività del rame, ad esempio, aumenta solitamente di circa lo 0,4% per ogni grado centigrado. La resistenza di una PDN può aumentare del 20% per un circuito da utilizzare a 75°C, rispetto alla temperatura di un ambiente di 25°C. Questo può anche essere un vantaggio – se la tensione di un sistema soddisfa le aspettative quando si riscalda durante un funzionamento a pieno carico, il progettista ha la certezza che il rame non raggiungerà temperature più alte del previsto, riducendo così la possibilità di guasti dovuti a temperature inattese in quel modello.

ALTRI RISULTATI DELL'ANALISI PI-DC

L'analisi PI-DC sui progetti può anche rivelare molte imperfezioni che non sarebbero altrimenti visibili. La realizzazione di un grafico della densità di corrente dei modelli dedicati all'alimentazione e alla messa a terra, ad esempio, mette in evidenza "penisole" e "isole" presenti su quei modelli. La **Figura 7** mostra i diagrammi di densità di corrente di un progetto a 2 strati dopo l'esecuzione di un'analisi PI-DC. Si possono notare la "penisola" blu scuro sullo strato superiore e l'"isola" sullo strato inferiore. Questa vista esclusiva dell'analisi PI-DC evidenzia aspetti del progetto che non sarebbero altrimenti visibili. Si noti che occorre prestare attenzione prima di presumere che un modello non utilizzato per l'analisi PI-DC, in relazione a una particolare tensione, non sia necessario. Quel modello potrebbe essere utilizzato per un'altra tensione, o per l'alimentazione in corrente alternata (collegata ai condensatori). Bisogna posizionare dei piccoli resistori al posto dei condensatori durante una simulazione PI-DC e controllare che la corrispondente distribuzione di corrente permetta al progettista di vedere se un'isola o una penisola in un modello dedicato alla potenza sia utilizzata per la distribuzione dell'alimentazione in corrente alternata (notare che i risultati in termini di corrente continua non saranno validi per questa simulazione). Le "isole" e le "penisole" di corrente sono particolarmente insidiose in questo caso, in quanto avranno frequenze di risonanza specifiche, che potrebbero causare dei guasti in presenza di determinate condizioni. Tali guasti potrebbero sembrare del tutto casuali e pertanto particolarmente difficili da individuare e riparare – una ricetta per i ritardi di convalida.

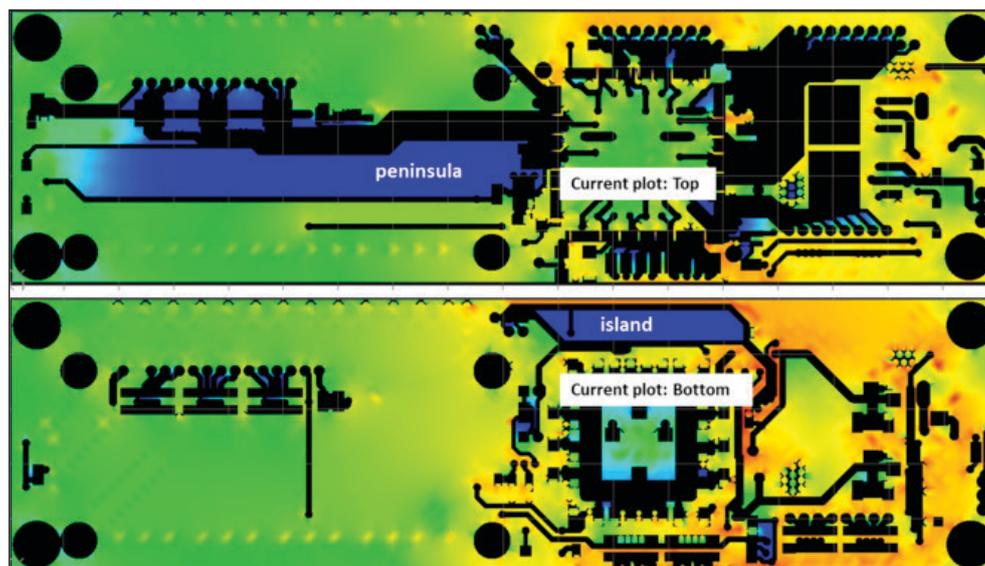


Figura 7: Grafici della densità di corrente in un modello dedicato alla messa a terra che evidenziano "penisole" e "isole"

I diagrammi di densità di corrente e tensione dei modelli dedicati all'alimentazione e alla messa a terra possono anche rivelare problemi di efficienza nel convogliare la corrente tra la sorgente di alimentazione e il carico (o i carichi). Il diagramma di tensione del modello dedicato alla messa a terra nella parte superiore della **Figura 8** evidenzia molto chiaramente l'inefficienza dei percorsi tra le sorgenti (i regolatori di tensione, o VR) e il carico (FPGA). Sebbene i motivi per non realizzare un percorso diretto tra le VR e il FPGA possano essere validi, l'analisi PI-DC evidenzierà le inefficienze, in modo che possano essere risolte, se possibile. Come nota a margine, va sottolineato che questo modello è problematico per la distribuzione dell'alimentazione in corrente alternata, in quanto potrebbe causare un'induttanza forse eccessiva nella traccia di messa a terra e nel corrispondente "ground bounce" (l'induttanza aumenta all'aumentare dell'area di loop).

ANALISI IN CORRENTE CONTINUA DI UNA PDN: UNO STRUMENTO ESSENZIALE PER IL PROGETTISTA DIGITALE

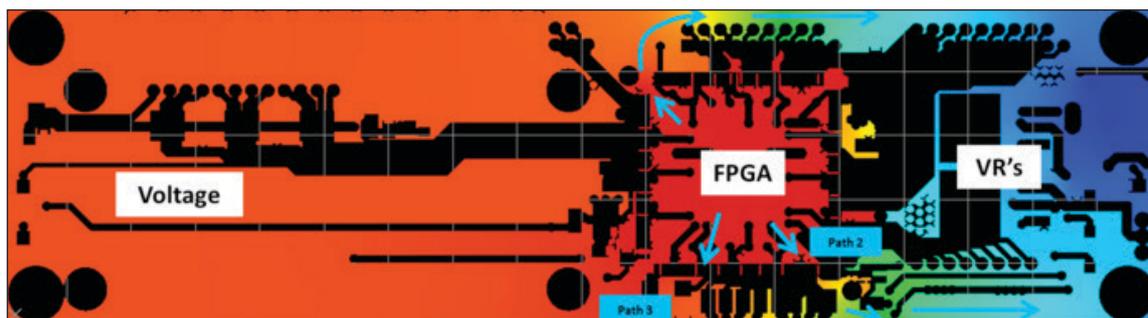


Figura 8: Grafico del modello di tensione dedicato alla messa a terra, che mostra i percorsi di ritorno della corrente

Ovviamente, il progettista deve sempre considerare il modello di messa a terra nel contesto del suo utilizzo, come percorso di ritorno per segnali ad alta velocità, che potrebbe quindi non sovrapporsi alla sua funzione di percorso di ritorno in corrente continua. I modelli di messa a terra (e alcuni di quelli di alimentazione) che potrebbero apparire come non necessari per la distribuzione di alimentazione in corrente continua, potrebbero invece essere fondamentali ai fini dell'integrità del segnale. Anche in questo contesto, tuttavia, le "isole" e le "penisole" dovrebbero essere evitate ed essere inserite nel progetto solo se non è disponibile un'altra alternativa. L'analisi PI-DC spesso evidenzia questi modelli indesiderati, quando sono presenti.

Un altro esempio in cui un grafico della densità di corrente PI-DC può essere illuminante è mostrato in Figura 9. In questo esempio, è molto evidente una piccola interruzione in un piano di messa a terra – il colore della densità di corrente cambia bruscamente da verde a blu nel punto dell'interruzione. Questo crea una profonda differenza nella distribuzione dell'alimentazione in corrente continua di quel modello, ed è molto difficile che un tale problema possa essere identificato senza visualizzare i risultati dell'analisi PI-DC.

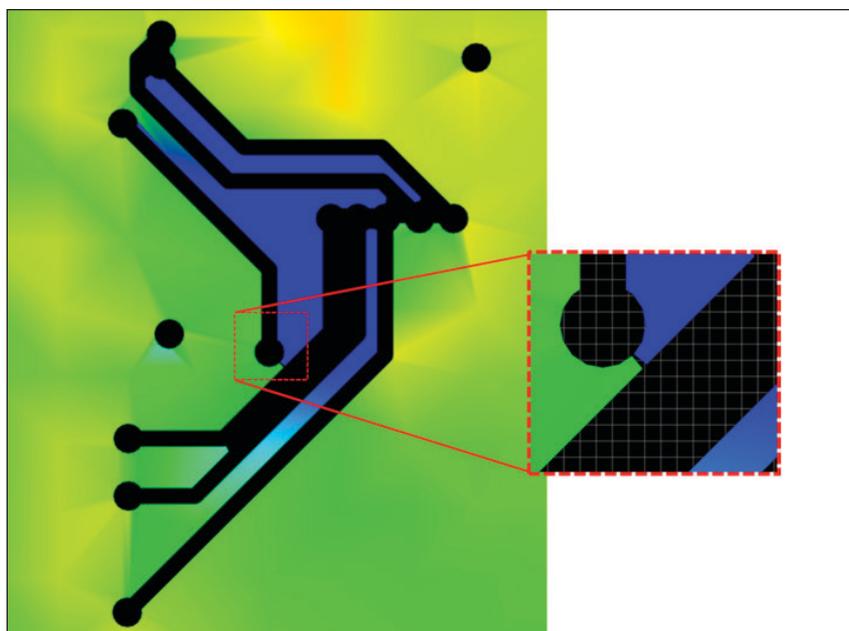


Figura 9: Piccola interruzione in un piano di messa a terra apparente, in un grafico di corrente di densità prodotto dall'analisi PI-DC

ANALISI IN CORRENTE CONTINUA DI UNA PDN: UNO STRUMENTO ESSENZIALE PER IL PROGETTISTA DIGITALE

Ci sono alcuni aspetti non intuitivi dell'analisi PI-DC che è opportuno sottolineare. La resistenza di un tracciato in corrente continua non dipende solamente dalla larghezza del tracciato, ma anche dalla lunghezza. Un tracciato in corrente continua può essere stretto, se non è troppo lungo, senza effetti significativi sulla distribuzione dell'alimentazione. Ad esempio, i tracciati (b) e (d) della Figura 10 hanno la stessa resistenza. Per comprendere la resistenza dei modelli in corrente continua il concetto di "quadrati" è fondamentale, come mostrato in Figura 10. Questo concetto consente al progettista di avere più flessibilità – potrà infatti ridurre la larghezza di un tracciato in corrente continua, se si tratta solo di una breve distanza, e successivamente allargare il tracciato il più possibile in spazi più ampi per compensare le limitazioni necessarie. L'uso della stessa larghezza per una rete di distribuzione dell'alimentazione su tutta la sua lunghezza è inefficiente, perché non fornisce la migliore distribuzione disponibile e utilizza grandi modelli dedicati all'alimentazione in maniera non necessaria.

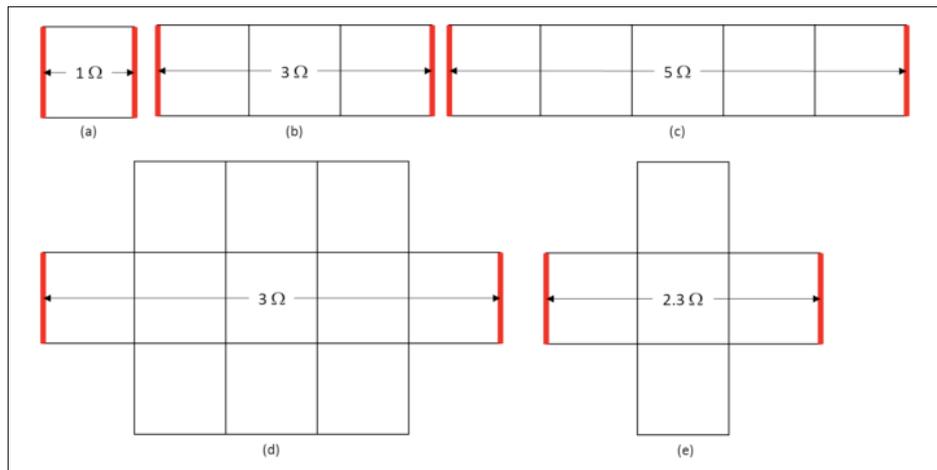


Figura 10: Resistenza dei modelli dedicati all'alimentazione espressa come "quadrati"

La Figura 11 mostra 4 modelli dedicati all'alimentazione con formati molto diversi, ma tutti con la stessa resistenza complessiva. L'analisi PI-DC offre ai progettisti la possibilità di modificare i modelli PDN per soddisfare le esigenze di distribuzione dell'alimentazione nel modo più efficiente.

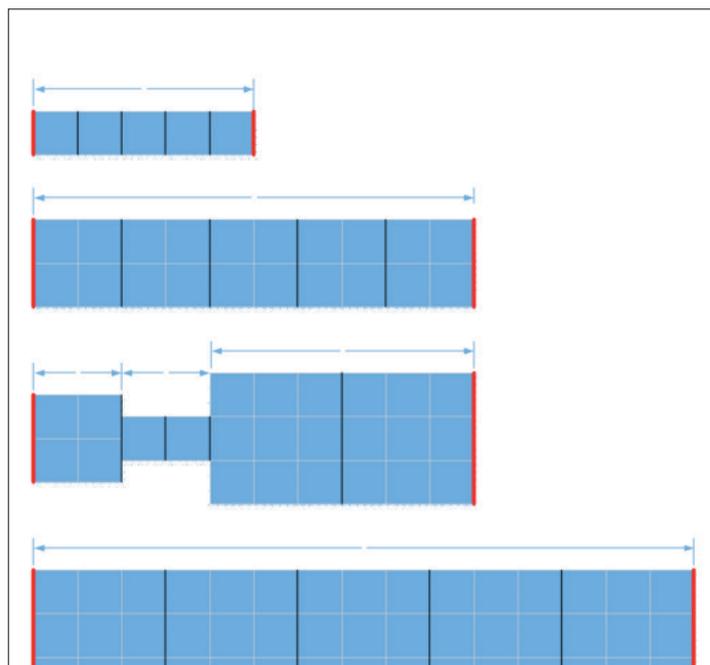


Figura 11: Modelli dedicati all'alimentazione con la stessa resistenza

ANALISI IN CORRENTE CONTINUA DI UNA PDN: UNO STRUMENTO ESSENZIALE PER IL PROGETTISTA DIGITALE

PERCHÉ I PROGETTI CON ERRORI FUNZIONANO BENE?

Quando si esegue l'analisi PI-DC su progetti esistenti, capita frequentemente di trovare molti "errori". Alcuni progettisti sostengono di trovare errori in quasi tutti i progetti sottoposti all'analisi PI-DC. – “Come fanno a funzionare se sono così pieni di difetti?”. Esistono 2 fattori principali che permettono il funzionamento dei circuiti con errori, anche quando si tratti di difetti nella loro struttura PI-DC:

1) La progettazione della distribuzione dell'alimentazione in corrente continua è storicamente molto conservativa. Per determinare la corretta larghezza di un conduttore per una specifica corrente, le specifiche IPC si focalizzano sulla larghezza, che dipende dall'aumento di temperatura consentito. I progettisti digitali di solito non hanno dati affidabili sull'aumento di temperatura tollerabile, quindi usano valori prudenti, probabilmente basati su esperienze passate, oppure inseriscono la "maggiore quantità di rame possibile". Se non sono sicuri che sia sufficiente, si basano sul controllo della tensione (o delle tensioni) in fase di verifica. Se il progetto soddisfa i requisiti, il progettista acquisisce maggiore esperienza e pertanto utilizza ciò che apprende dal progetto in corso come linea guida per i progetti futuri. In assenza di progetti fallimentari, il progettista non ha modo di sapere se può ridurre la quantità di rame dedicato alla distribuzione dell'alimentazione e per questo continuerà a utilizzare valori conservativi. Nella progettazione c'è abbastanza margine per accettare dei difetti, anche significativi.

2) Le "penisole" e le "isole" non influiscono negativamente sulla distribuzione dell'alimentazione in corrente continua, ma possono avere un effetto negativo sulla distribuzione dell'alimentazione in corrente alternata e/o sull'integrità del segnale in un modo apparentemente casuale. Sono un'indicazione che un progetto può essere migliorato, ma potrebbero non causare alcun problema al progetto in termini di distribuzione dell'alimentazione in corrente continua. Rappresentano altre speciali problematiche per la distribuzione dell'alimentazione in corrente alternata e per l'integrità del segnale in quanto potrebbero entrare in "risonanza" a determinate frequenze. Se queste frequenze sono stimolate nel modello, la PDN potrebbe essere soggetta a un disturbo eccessivo in corrente alternata, oppure se sono presenti dei segnali adiacenti al modello, tali segnali potrebbero essere soggetti a un disturbo significativo sulle frequenze di risonanza, causando errori logici. In entrambi i casi, gli errori dipenderanno dall'esistenza di specifiche frequenze di risonanza e potrebbero verificarsi in modo apparentemente casuale, oppure in circostanze molto particolari, rendendone quindi estremamente difficile la replica, l'individuazione e la correzione. È molto più saggio adottare misure per mitigare preventivamente questi problemi particolarmente insidiosi.

Forse sarebbe più indicato parlare di "imperfezioni", "aree di miglioramento" o "situazioni non ideali" invece che di "errori". Attualmente, essendo fondamentale la durata della batteria e la riduzione dei costi, essere eccessivamente prudenti o accettare difetti, quali le penisole in un modello dedicato alla potenza, può fare la differenza tra un prodotto scadente e uno di successo e tali parametri non possono più essere ignorati. L'analisi PI-DC non solo fornisce informazioni sull'adeguatezza di una PDN, ma è inoltre in grado di indicare se sono necessari modelli dedicati alla distribuzione dell'alimentazione.

ASSICURARSI DI LIMITARE LA CORRENTE

Nella progettazione di una PDN è importante prevedere circostanze non pianificate. Il progettista deve essere consapevole che, nel caso di un aumento estremo della corrente (ad esempio un cortocircuito a terra), un modello ottimizzato dedicato all'alimentazione potrebbe non essere in grado di assorbire la corrente supplementare e quindi danneggiare il circuito. È quindi necessario utilizzare alcuni mezzi per limitare il flusso di corrente in casi estremi, ad esempio, un'alimentazione in direzione di qualsiasi connettore che potrebbe essere in cortocircuito durante l'installazione.

ANALISI IN CORRENTE CONTINUA DI UNA PDN: UNO STRUMENTO ESSENZIALE PER IL PROGETTISTA DIGITALE

DETERMINARE LA DIMENSIONE E IL NUMERO DI VIAS

Una regola empirica, comunemente usata per la distribuzione dell'alimentazione, è quella di inserire un numero di vias tale che l'area della loro sezione trasversale sia uguale o superiore a quella dei modelli dedicati all'alimentazione collegata ad esse. L'esperienza indica che questa regola è sufficiente, ma grazie a uno strumento PI-DC è possibile capire se è anche necessaria. Nella maggior parte dei progetti odierni, l'uso eccessivo di vias, o l'uso di vias di grandi dimensioni, causa limitazioni all'instradamento in tutti gli strati sopra e sotto la transizione, pertanto non è un'operazione da sottovalutare. L'uso di vias non necessarie in un modello dedicato all'alimentazione potrebbe avere un impatto negativo su un altro modello dedicata all'alimentazione presente su altri strati. Uno strumento PI-DC permette di misurare l'effetto delle vias sulla PDN. La **Figura 12** mostra 7 vias (cerchiate ed etichettate da "a" a "g") in un progetto di distribuzione dell'alimentazione. Un esame attento rivela che nelle 3 vias "a", "b" e "d" è evidente un cambio di colore significativo, che indica un corrispondente calo di tensione dovuto a ciascuna delle tre vias. Misurando la tensione esatta nella parte superiore e inferiore di queste vias, (una funzione comune degli strumenti PI-DC) il progettista può determinare se le dimensioni e il numero di vias sono adeguate e necessarie. Come spiegato in precedenza, esiste una certa ambiguità nel dimensionamento esatto delle vias nelle simulazioni, per cui bisogna considerare attentamente, ad esempio, gli effetti dello spessore della placcatura. Notare che le vias sono solitamente rappresentate come "elementi raggruppati", ai quali viene assegnato un valore di resistenza in funzione del diametro e della lunghezza della vias, e non sono in genere "soluzionate" come colonne complesse all'interno della risoluzione. Questo rende le simulazioni più veloci e non sacrifica l'accuratezza.

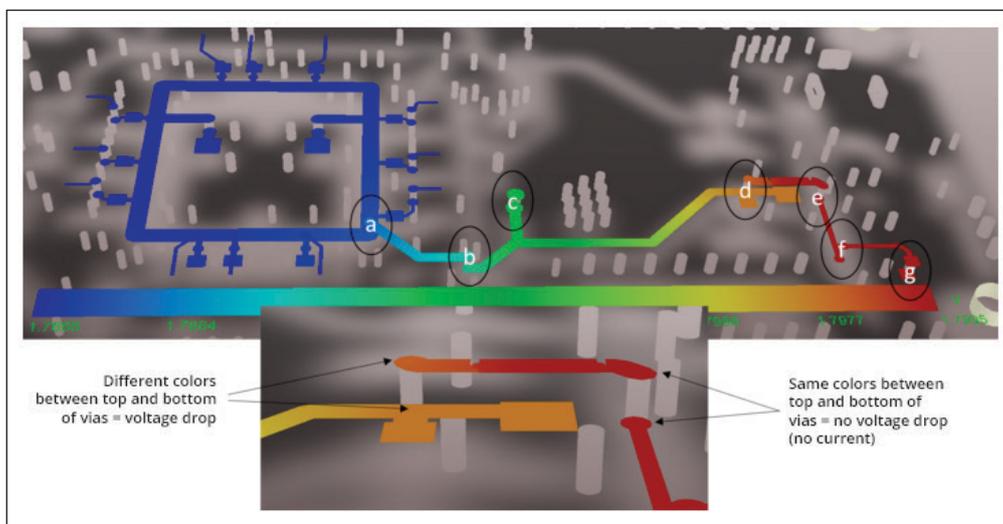


Figura 12: Grafico della tensione che mostra il calo di tensione delle vias e dei modelli

CONCLUSIONI

Un simulatore PI-DC è uno strumento essenziale per tutti i progettisti digitali, in quanto fornisce informazioni preziose su come ridurre le dimensioni e la complessità di un progetto, migliorandone al contempo le prestazioni. L'ottimizzazione della rete di distribuzione dell'alimentazione consente di risparmiare prezioso spazio di progettazione e strati, con una conseguente riduzione dei costi e un aumento delle prestazioni e dell'affidabilità. La simulazione PI-DC è uno strumento essenziale per ogni progettista digitale (e analogico).