

何が違う？ 回路シミュレータ

上級者にも聞いてほしい、
「パワエレ向け」の違いと、モデル・解法の話



株式会社スマートエナジー研究所
代表取締役社長

中村創一郎

spice系とパワエレ向けシミュレータとは

spice系Sim

- LTspice
 - Pspice
 - Hspice
 - Qspice
 - SIMetrix
 - TINA TI
- など、

パワエレ向けSim

- Scideam
 - PSIM
 - PLECS
 - SIMPLIS
 - Simscape
- など、

この二つの違いについて、一般論とScideam、LTspiceについてお話します。

シミュレータ、なんだかうまくいかない

シミュレーションが
始まらない

周波数特性が
取れない

モデルが
動かない

思った結果に
ならない

シミュレーションが
極端に遅い

回路が発振して
動かない

エラーが
解決できない



結論

どちらにも得意不得意があります
シミュレータの特徴を良く理解して使う必要があります

spice系は、

得意

半導体の非線形な挙動を解きやすく

苦手

スイッチングのような急峻な挙動を解く

パワエレ系（理想スイッチ系）は、

得意

スイッチングのような急峻な挙動を解き
やすく

苦手

半導体の非線形な挙動を解くことができない

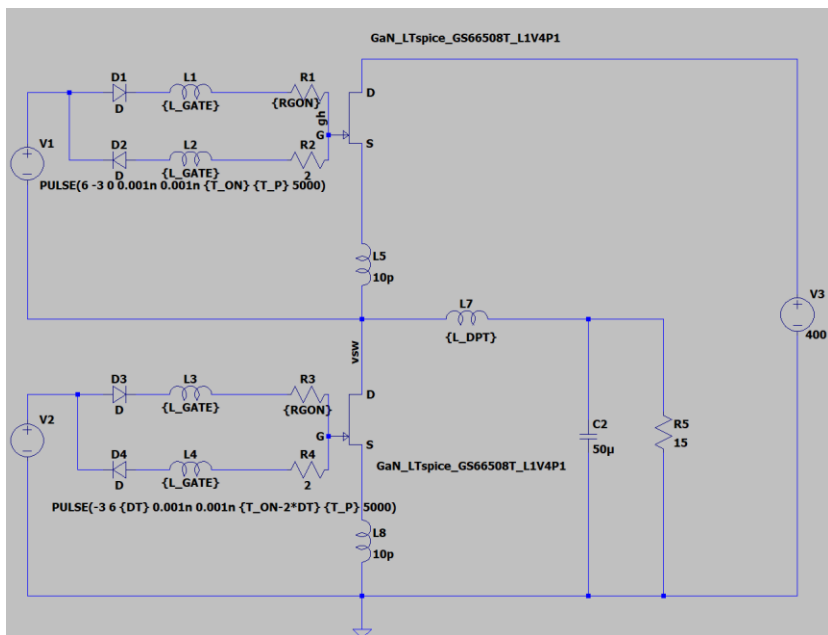
Scideamでは、様々な工夫で半導体の挙
動を解いていきます

各シミュレータの使い方

どうやって使われることを想定しているのか

spice系

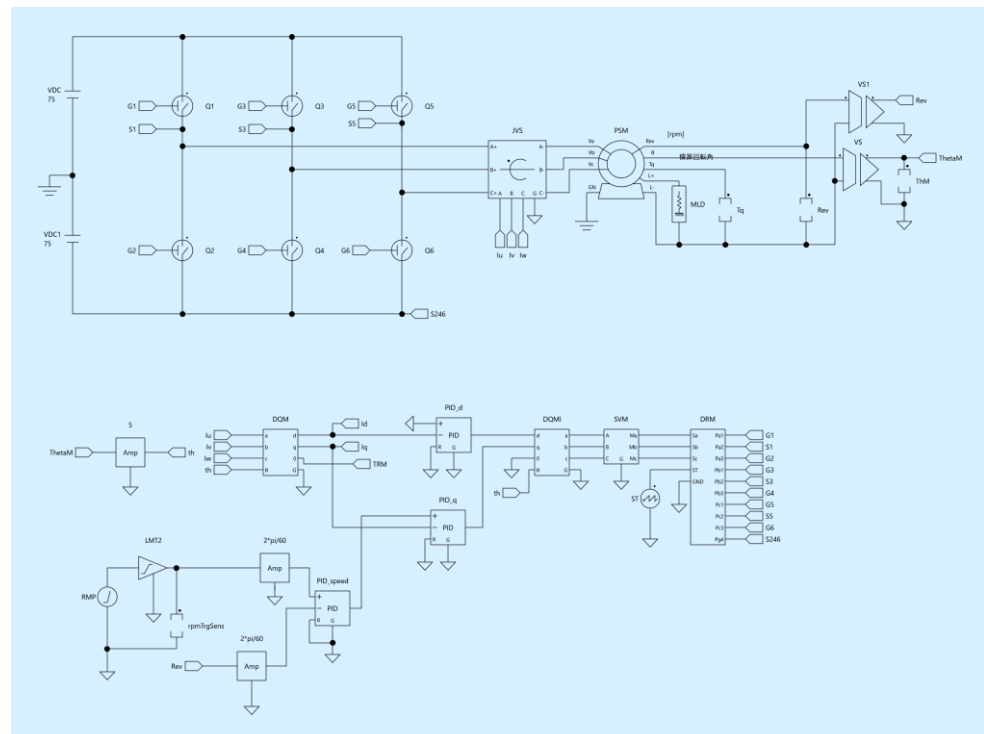
半導体の挙動を確認したい
電源ICの挙動を確認したい



一部を取り出して、挙動確認
ただし、システムとしての挙動は確認難しい

パワエレ系

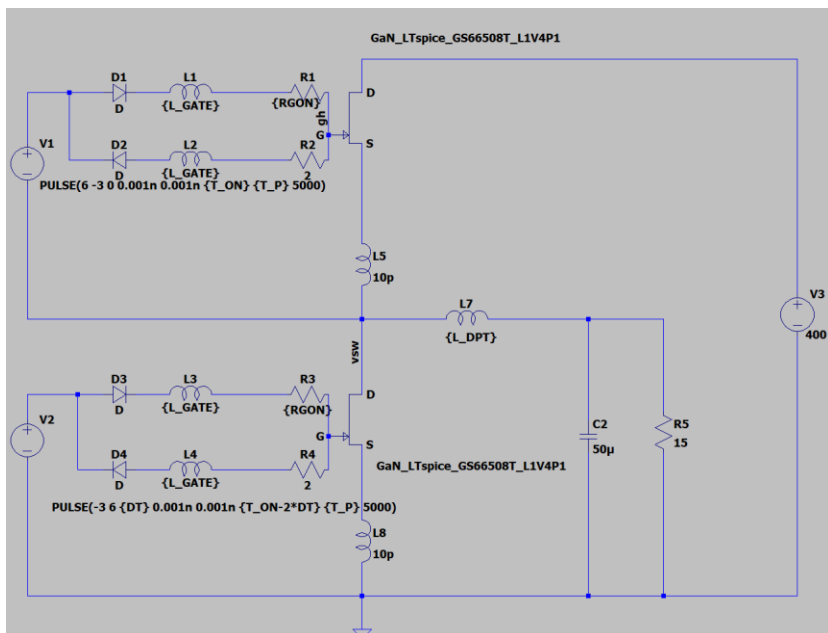
システムとして、制御系まで含めて確認したい
パワコンシステムとして、動作確認したい



大きな規模として動作確認
ただし、半導体の細かな挙動は確認難しい

spice系シミュレータの計算エンジン

Spice系のシミュレータ



**半導体の挙動を
解くために設計されている**

LTspiceについて

Linear Technology（アメリカ、現在はアナログ・デバイセズが買収）によって、spiceシミュレータを基にして開発された無償の回路シミュレータで、トランジスタや、FET、電源ICの挙動を解析するのに特化した強力なシミュレータ

さまざまな半導体メーカーから、LTspice用の素子モデルが提供されており、デバイスモデルを組み合わせることでシミュレーションすることが可能

一方で、インバータ回路やパワエレ向けの大規模な回路モデルなどを解くときは注意が必要

spiceの詳細FETモデルについて

ロームのMOSFETモデル

```
* RSR020N06 NMOSFET model
* Model Generated by ROHM
* All Rights Reserved
* Commercial Use or
* Resale Restricted
* Date: 2011/05/09
*****D G S
.SUBCKT RSR020N06 1 2 3
M1 11 22 3 3 MOS_N
D1 3 1 DDS
R1 1 11 RTH 101m
D2 22 11 DDG
R2 2 22 18
.MODEL MOS N NMOS
+ LEVEL=3
+ L=2.0000E-6
+ W=1
+ KP=24.202E-6
+ RS=10.000E-3
+ RD=0
+ VTO=1.8772
+ RDS=60.000E6
+ TOX=2.0000E-6
+ CGSO=124p
+ CGDO=8p
+ CBD=0
+ RG=0
+ N=2
+ RB=1.0000E-3
+ GAMMA=0.8
+ ETA=0.0015
+ KAPPA=0
+ NFS=17G
.MODEL DDS D
+ IS=5.9569E-12
+ N=1.1114
+ RS=8.6439E-3
+ IKF=41263
+ CJO=95.567E-12
+ M=.46779
+ VJ=.78156
+ BV=60
+ TT=27n
.MODEL DDG D
+ CJO=72.592E-12
+ M=.61822
+ VJ=.75035
+ N=10000
+ FC=-0.5
.MODEL RTH RES
+ TC1=0.0074
+ TC2=0.000024
.ENDS RSR020N06
```

MOSFET パラメータ (LEVEL1~3)

パラメータ	説明	単位	デフォルト値
LEVEL	モデル指数	-	1
L	チャネル長	meter	DEFL
W	チャネル幅	meter	DEFL
KP	相互コンタクト係数	amp/volt ²	2.00E-05
RS	電源オーム抵抗	ohm	0
RD	ドレインオーム抵抗	ohm	0
VTO	0バイアス閾値電圧	volt	0
RDS	ドレイン電源間シャント抵抗	ohm	無限大
TOX	酸化膜の厚さ	meter	*
CGSO	単位チャネル幅あたりのゲート電源間オーバーラップ容量	farad/meter	0
CGDO	単位チャネル幅あたりのゲートドレイン間オーバーラップ容量	farad/meter	0
CBD	0バイアス時のバルクドレイン間p-n接合容量	farad	0
RG	ゲートオーム抵抗	ohm	0
N	バルク p-n 接合放出係数	-	1
RB	バルクオーム抵抗	ohm	0
GAMMA	バルクしきい値パラメータ	volt ^{1/2}	*
ETA	静的フィードバック (レベル 3 のみ)	-	0
KAPPA	飽和電界ファクタ (レベル 3 のみ)	-	0.2
NFS	高速表面単位密度	1/cm ²	0
UO	表面移動度	cm ² /volt·sec	600

DIODE パラメータ

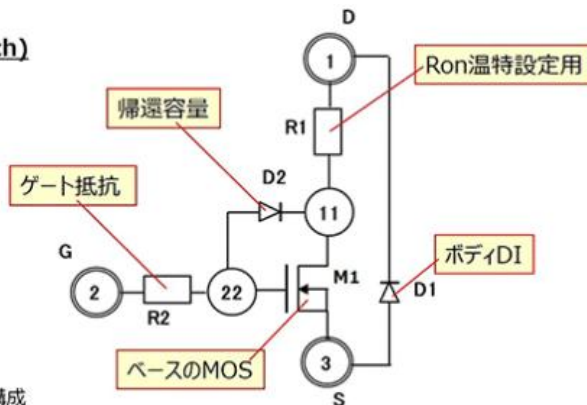
パラメータ	説明	単位	デフォルト値
IS	飽和電流	amp	1.00E-14
N	放出係数	-	1
RS	寄生抵抗	ohm	0
IKF	高注入「折れ曲がり」電流	amp	無限大
XTI	ISの温度指数	-	3
EG	バンドギャップ電圧 (バリアの高さ)	eV	1.11
CJO	ゼロバイアスp-n接合容量	farad	0
M	p-n接合粒度係数	-	0.5
VJ	p-n接合電位	volt	1
FC	順方向バイアス空乏層容量の係数	-	0.5
ISR	再結合電流パラメータ	amp	0
NR	ISRの放出係数	-	2
BV	逆方向降伏屈曲電圧	volt	無限大
TT	遷移時間	sec	0

RESISTOR パラメータ

パラメータ	説明	単位	デフォルト値
TC1	1次温度係数	°C ⁻¹	0
TC2	2次温度係数	°C ⁻²	0

ロームのMOSFETモデル構成 (Nch)

```
*****D G S
.SUBCKT xxxxxx 1 2 3
M1 11 22 3 3 MOS_N
D1 3 1 DDS
R1 1 11 RTH
D2 22 11 DDG
R2 2 22
```



※Pchも、極性を変えるだけで同じ構成

非線形特性をモデリングするため、FETサブサーキット内の各素子を非線形に動かしています。この特性を解析しやすいように、演算アルゴリズムが構築されています。そしてモデルの非線形を計算するために、シミュレータは時間幅を細かく刻みながら計算します。

シミュレーションが遅くなる理由

- 実は、モデルが大きい
- 非線形の挙動を解析するためには刻み幅を細かくしなければならない

$$\text{計算量} = \text{モデルサイズ} \times \text{刻み周波数}$$

モデルが複雑になると、どちらも大きくならざるを得ない

回路図としては一つの素子かもしれないが、
実際どのようなモデルを解こうとしているのか、
ユーザーはよく考えてモデリングする必要がある

理想スイッチは甘くない

理想スイッチでやれば、
モデルも軽いし、早く計算できるのでは！

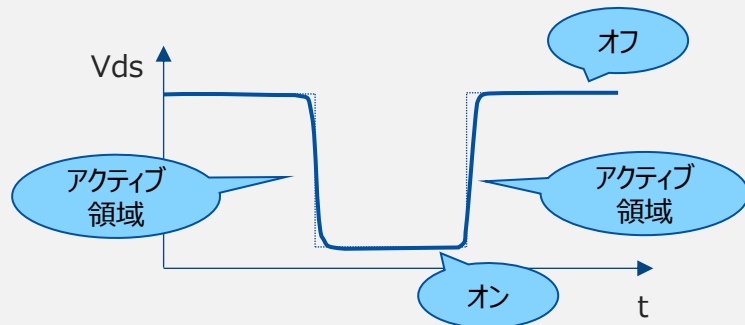
これで、インバータ回路や、大規模な回路も構築できるぞ！
と思われた方、よく注意してください

なぜなら、spiceは連続的な挙動を前提として計算エンジンを構築しているためであり、
あまりに急峻な変化は、数値解析的に収束性の悪化や発散など、不安定になりやすいためです

参考：https://edn.itmedia.co.jp/edn/subtop/features/spice_design/
EDN「SPICEの仕組みとその活用設計」記事一覧

理想スイッチの時

詳細スイッチモデル

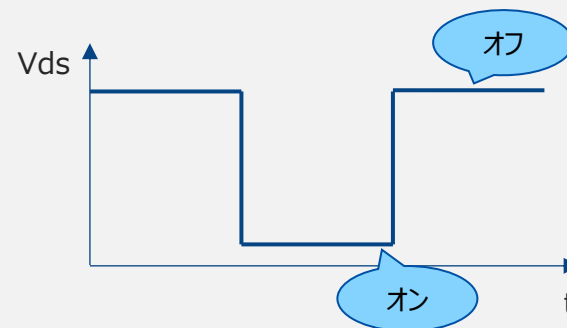


非線形の領域を連続的に解いていくことが可能



spice計算エンジンは、こちらの挙動が解きやすい

理想スイッチモデル



不連続が発生



刻み時間を細かくせざるを得ない
何とか連続のものとして解いていく

LTspice 数値計算エラー対処法

ソルバ設定の変更

- ソルバ種類をGear法に変更してみる
 - 計算時間が長くなる可能性があるが、収束性が改善する可能性有り
- 最大刻み幅を小さくする
 - 1ステップの計算の変化量を小さくして、収束性を改善する
ただし、計算時間は長くなる
- 電圧変化をスロープにする
 - パルスなどに明示的にスロープを入れることで、変化を滑らかにし、収束性を改善する



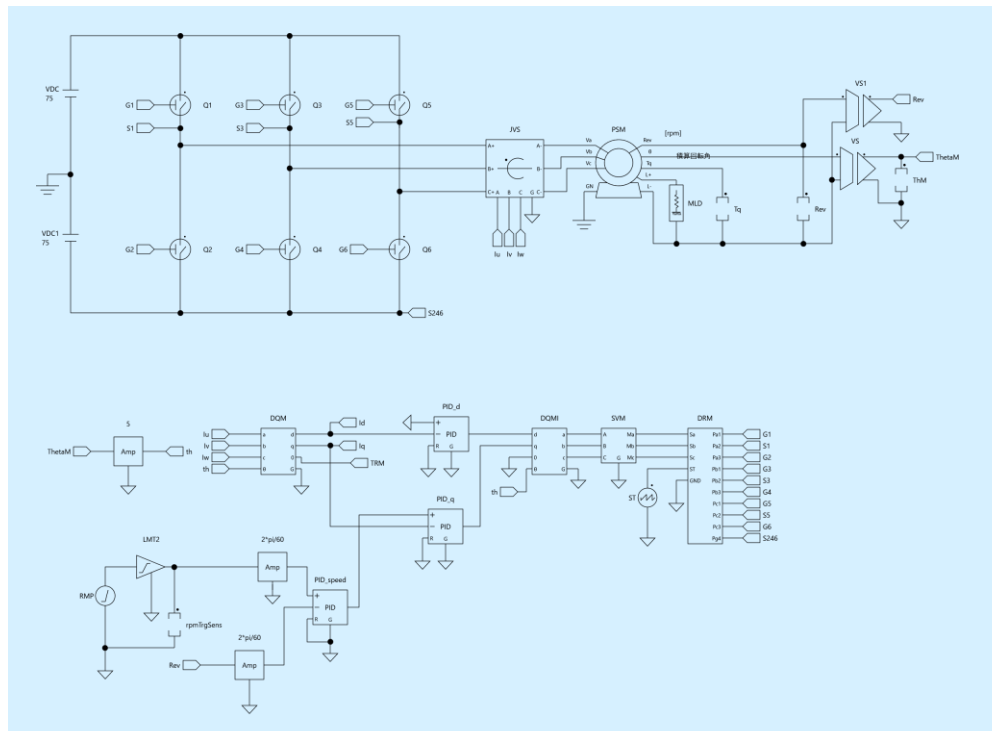
実は、これらのエラー対処法は、
パワエレ向けシミュレータでは
多くの場合役に立ちません。

参考：Rohm様「LTspiceモデルの使い方 収束性の改善ヒント」

https://fscdn.rohm.com/jp/products/databook/applinote/common/how_to_use_ltpice_models_tips_for_improving_convergence_an-j.pdf

パワエレ向けシミュレータの計算エンジン

スイッチのオンオフを 高速に解くために設計されている



パワエレ向けシミュレータの一般的な特長

- 理想スイッチを使用、軽いモデルが利用できる
- スwitchの不連続な挙動を解けるように計算エンジンが構築されている
- 高速で安定して解くことができる

Scideamの特長

- スwitchやダイオードのオンオフを、精度良く判定するアルゴリズムが組み込まれている
- スwitching電源向けに最適化された可変ステップアルゴリズムと、自動パラメータ設定によりモデルに合わせて常に最適な刻み時間で解析が可能

参考：Scideamマニュアル, シミュレーションエンジンについて

https://www.smartenergy.co.jp/support/ScideamArticles/help/scideam_help/simulation_configuration/simulation_engine/simulation_engine/

理想スイッチモデルについて

理想スイッチモデル
(半導体やダイオード)



オフ

$R_{on} = 1\text{M}\Omega$



オン

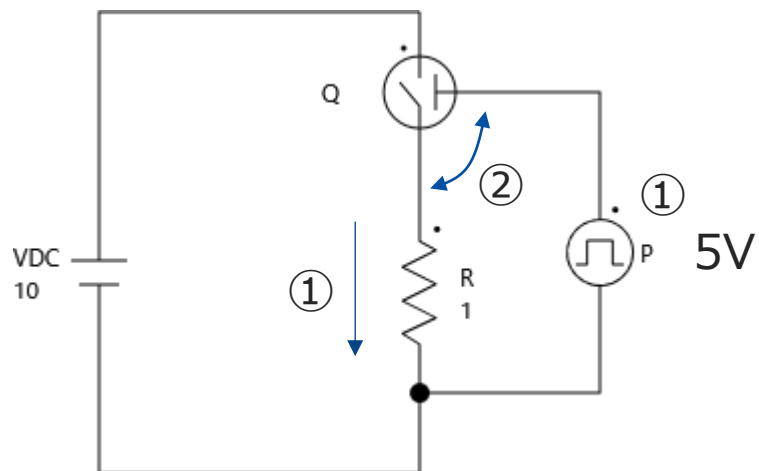
$R_{on} = 1\text{m}\Omega$

理想スイッチのオンの状態とオフの状態を判別して
状態毎に解析をしていく

計算アルゴリズムがそもそもspiceと異なる

軽い！

パワエレ向けSimのエラー条件 例



例えば、左図のような回路を考えた時
パルスPによってスイッチQのゲートがオンしたらどうなるでしょう。

理想スイッチのオン条件が

$V_{gs} > 2V$

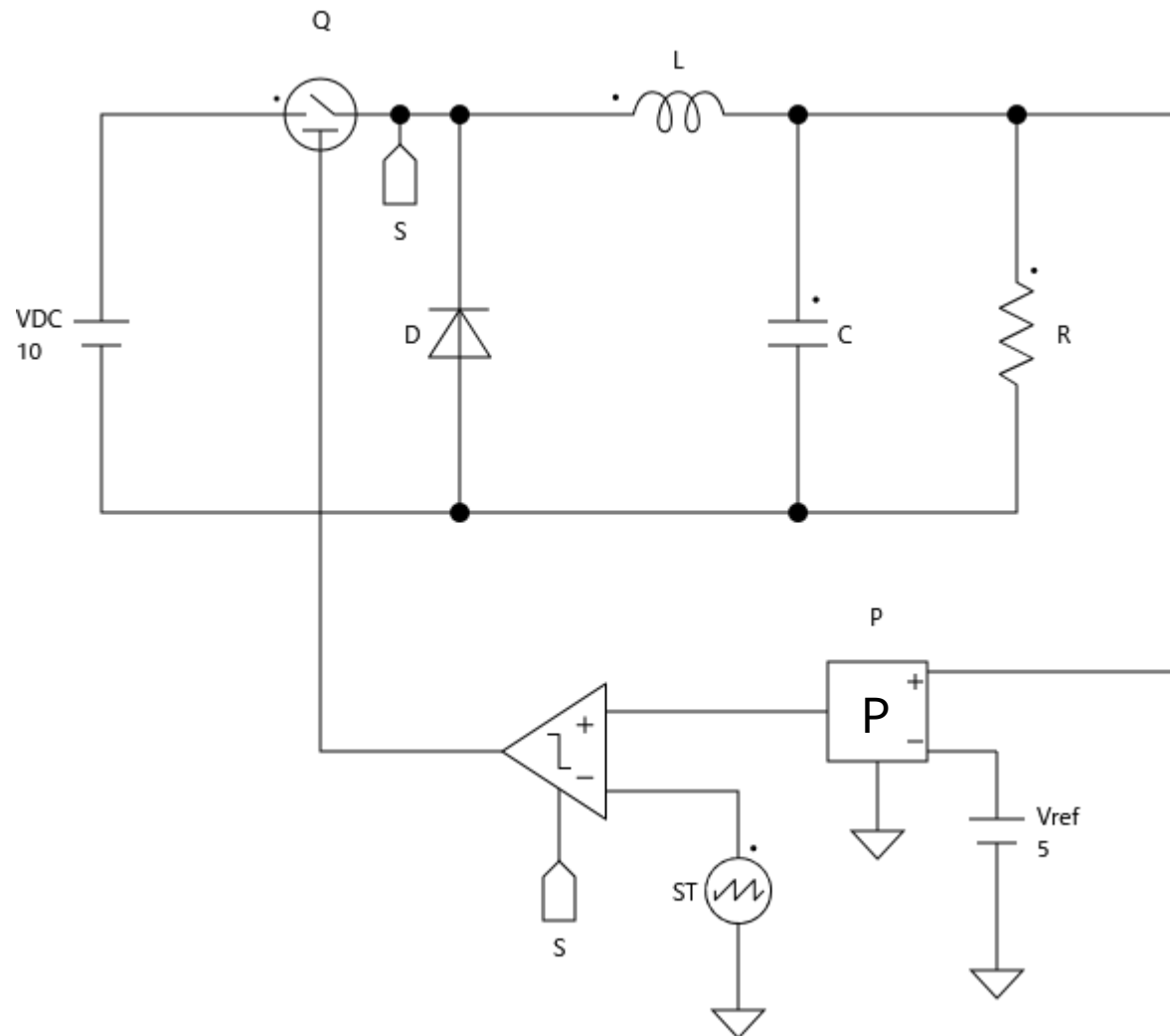
とすれば、閾値電圧を超えた条件で、瞬時にオンオフが切り替わります。

すると以下ようになります

- ① スイッチがオンすることによって電流が流れる
- ② 抵抗Rによって V_{gs} 電圧がPよりも10V分持ち上がる
- ③ スイッチがオンできなくなる

Pがオンすると矛盾が発生してしまい、解が不定に！

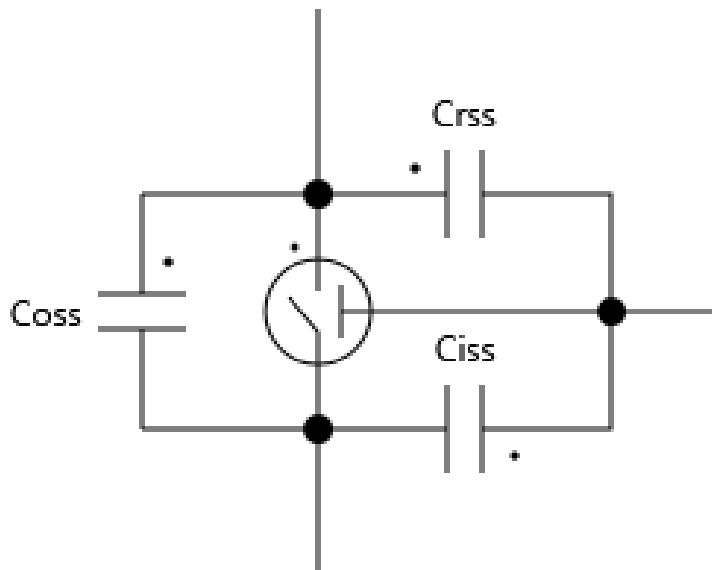
フィードバック制御によって矛盾が発生



先ほどのページの似た例

パラメータによってはP制御によってスイッチをオンしてしまうと、オフしなければならない条件になってしまうという矛盾が発生する（場合がある）

電圧や電流が決まらない条件



スイッチがステップ状にオン・オフした瞬間に、
電流が各コンデンサに流れ、それぞれがループしてしまい、
電圧電流が定まらない
さらにゲート電圧も変動させてしまい、
スイッチの状態も不定になる可能性も

パワエレ向けSim エラーの対処法

- 矛盾が発生しないようにモデルを修正する
 - どうしても、矛盾が発生してしまうようなロジックの場合は、Cやヒステリシス、RCフィルタによる遅れなどを利用し状態決定をしやすいにする
- 適切な初期値を与える
 - 初期条件が決まらず不定になるような回路の場合は、CやLに適切な初期電圧、電流を与える



spice系と比べると、アルゴリズムが違うために、解決法も違う
ソルバの設定では解決できない場合も多く、モデルの修正が解決に役立つ場合がほとんど

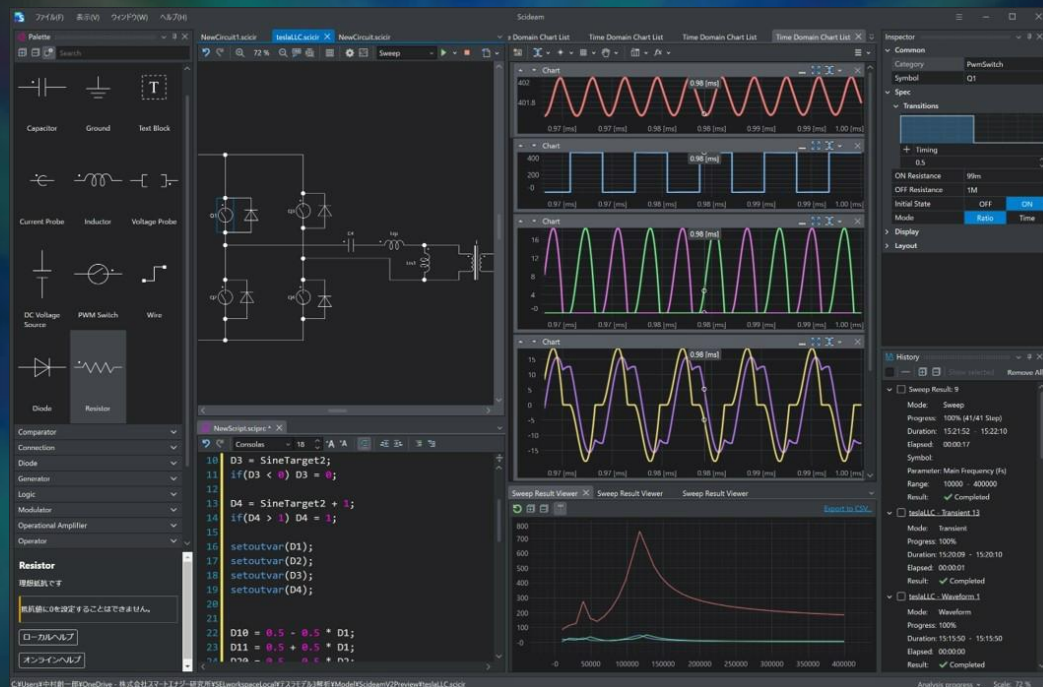
30年間支持される



Scideam

サイディーム

パワエレ向け高速回路シミュレータ



演算力。

Scideamの計算エンジンの特長

最適化された
可変ステップソルバ



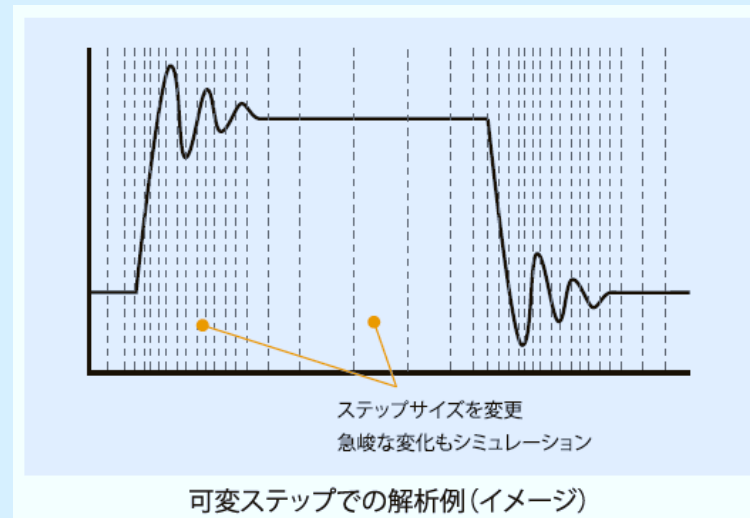
モデルに合わせた
ソルバの自動設定



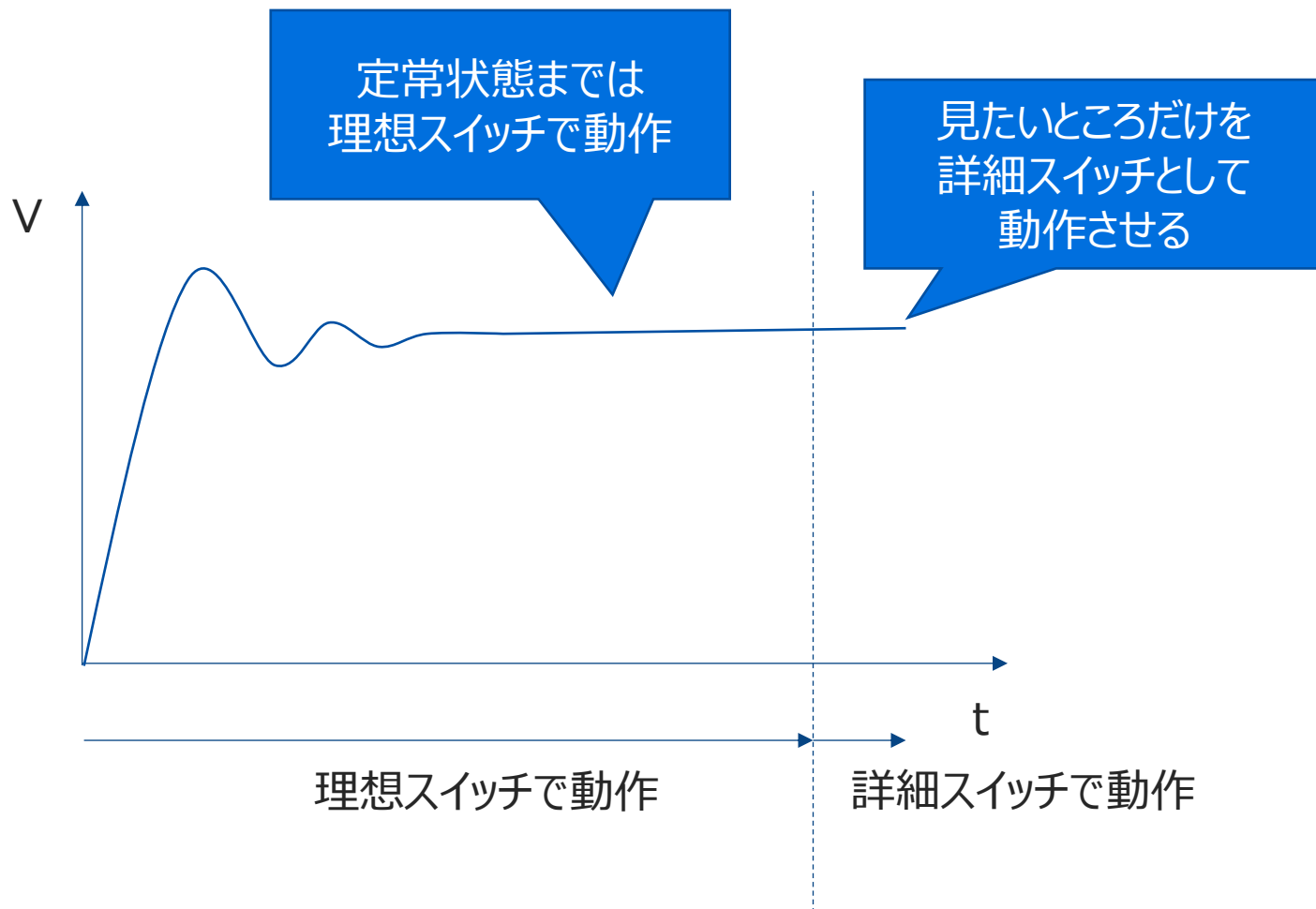
高速安定解析

Scideamでは、
スイッチング解析向けに最適化された可変ステップソルバと、モデルに合わせたソルバの自動設定により、
難しい設定なく、いつでも高速安定解析
を行うことが可能
他社にない最大の特徴です。

さらに、
厳密なスイッチ・ダイオードのオンオフ判定、
非線形素子への対応なども特長です。



非線形素子への対応・損失解析



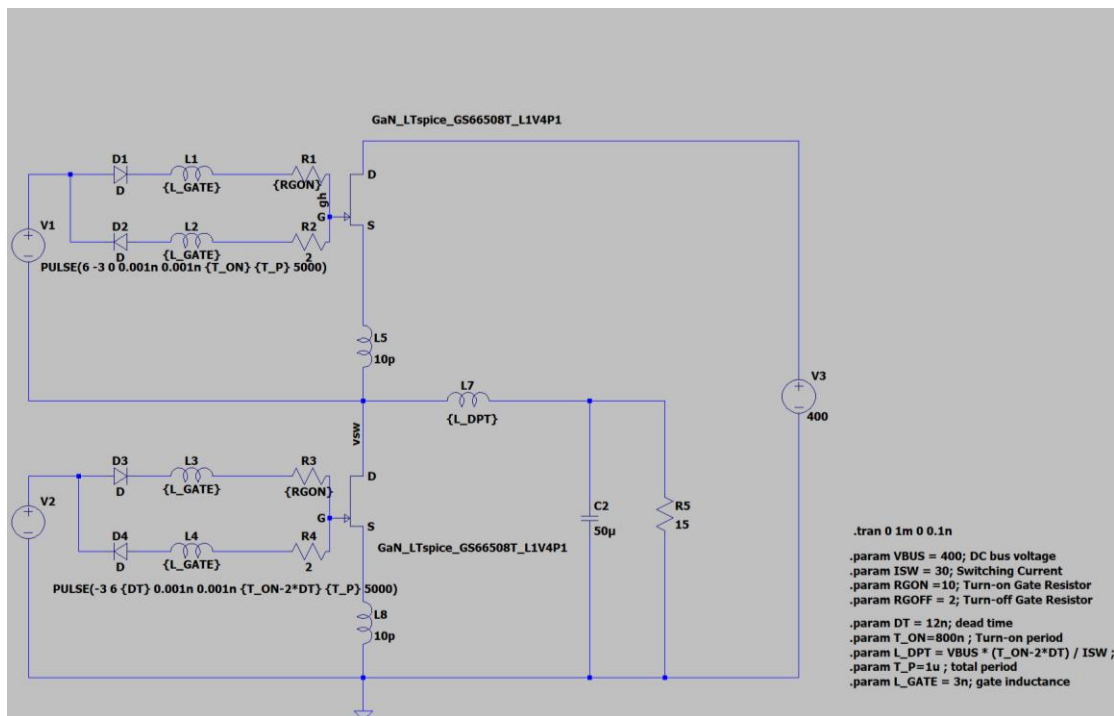
定常状態まで理想スイッチで一気に解析

見たいところだけを詳細スイッチで細かく解析

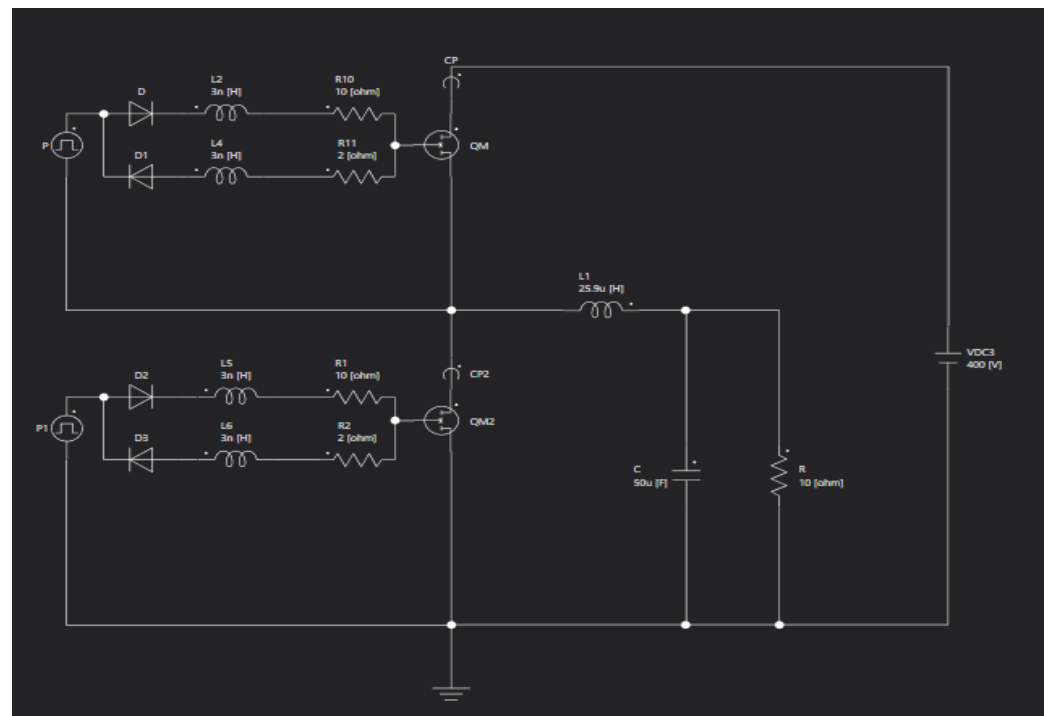
**理想スイッチモデルと
詳細スイッチモデルの
いいところ**

回路図・条件

LTSpice



Scideam

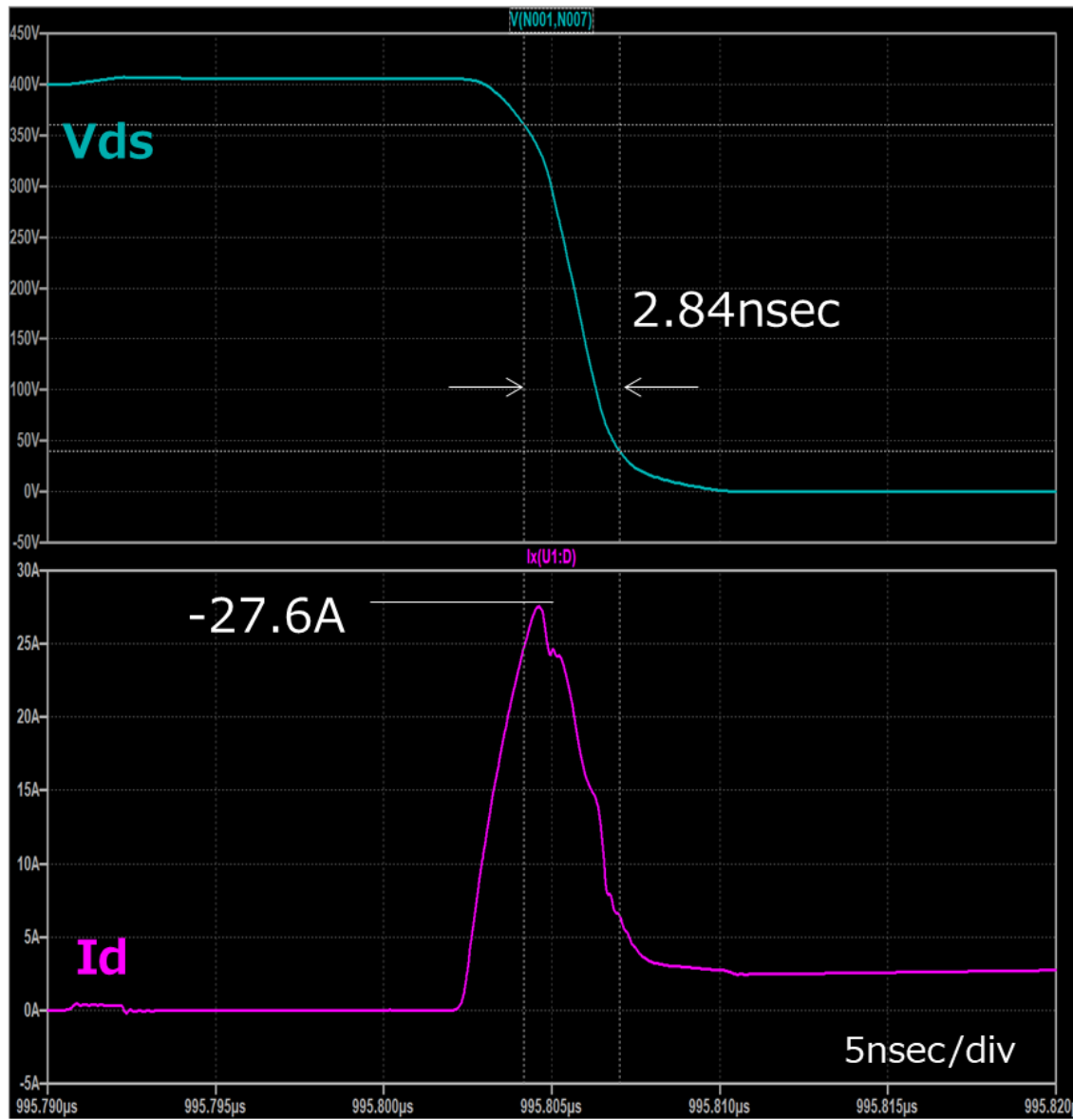


シミュレーション条件

- スイッチング周波数：1MHz
- シミュレーション時間：1msec

降圧型コンバータ1MHz：ターンオン時の波形比較

LTSpice：メーカー提供モデル



Scideam：GaNスイッチモデル



解析結果比較

シミュレーション条件：1msec Transient

LTSpice

Scideam

解析時間

11分38秒

5秒

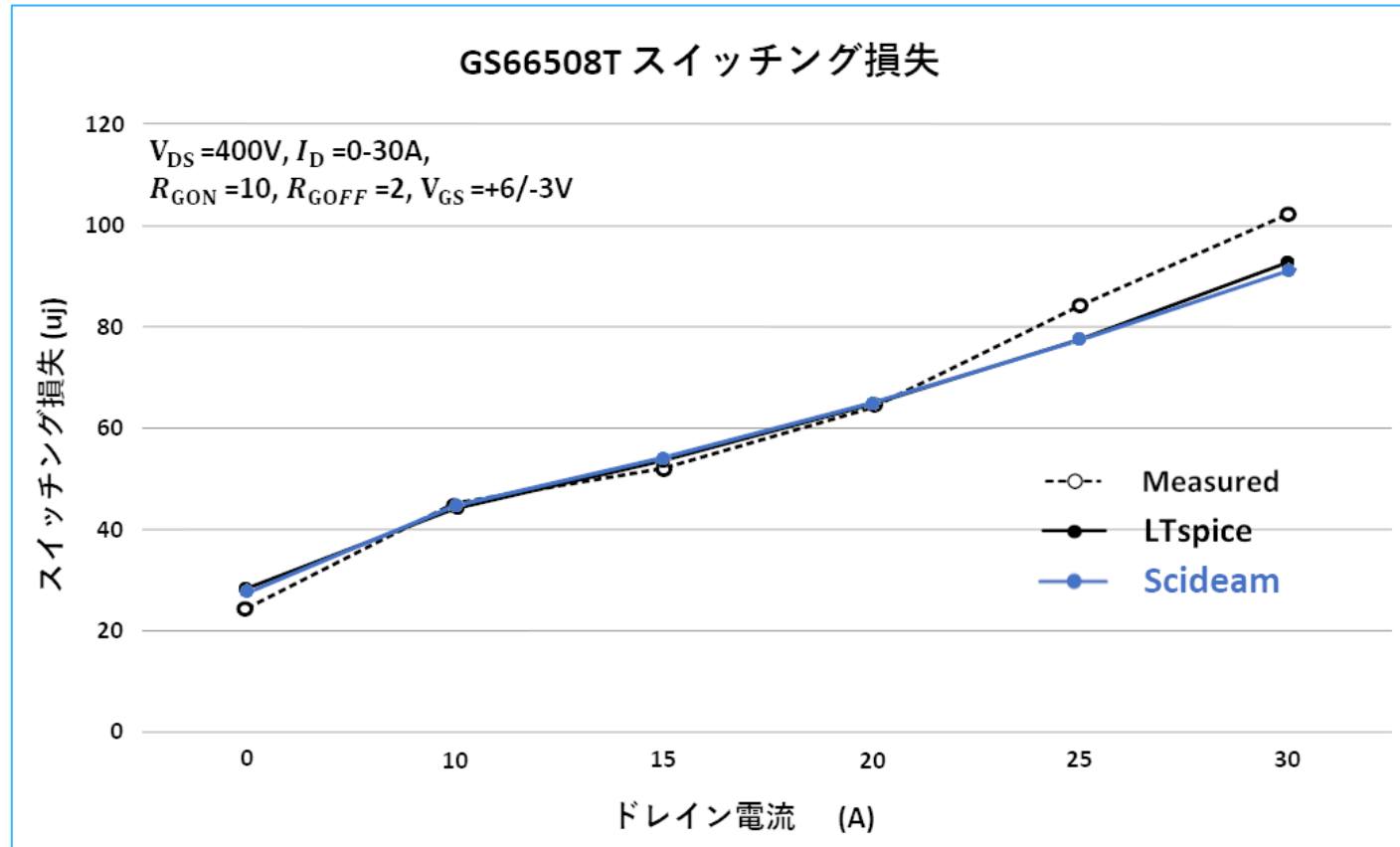
違いが生まれる理由

- 電気回路のための汎用ソルバである
- メーカーの詳細モデルが全部入り
- 本モデルはメーカーサンプルのソルバ設定で実行している。最大刻み幅0.1nsec（精度が必要なためと考えられる。ただし、どこまで精度が必要か不明）

- 理想スイッチと詳細スイッチを組み合わせで解析
- 詳細スイッチモデルが計算エンジンに最適化された軽量なものを使用
- 計算刻み幅が大きく取れるように工夫されている

ダブルパルステスト回路（インダクタ有版）⑧

GaNSystems資料との結果比較



Scideam 数値解析エラーへの対処



- エラー発生原因の対処法についてのサポートページの充実
- 有償サポートも含めた、サポート体制の充実
- ツールとして、エラー解決のための補助機能の開発

皆様に安心してお使いいただけるように、取り組んでおります。

高速回路シミュレータ
The Simulation platform for Next-Gen Power Electronics



サイディーム
パワエレ向け高速回路シミュレータ

30年間支持される演算力

高速安定解析 損失解析 モーター制御

サイディームは、電源開発、パワーエレクトロニクス開発に特化した国産の高速回路シミュレータです。30年以上の歴史のある演算アルゴリズムと新たに開発した回路エディタ、波形ビューワにより快適なシミュレーション環境を提供します。

モデリング支援・受託開発
Modeling Support / Contracted Development



**モデルベース開発による一貫した開発
シミュレーションを全面に使用**

モデリング 設計・解析 パワエレ開発

モデリング環境構築、回路設計やパラメータ分析など、上流設計のサポートから、パワーコンディショナ、デジタル制御電源の受託開発まで、お客様のご要望にお応えいたします。

回路シミュレータ自社開発 を行う パワエレ技術・解析・開発支援 に強みを持った会社です

エンジニアリング	系統連系インバーター開発、双方向コンバーター開発、デジタル電源開発
開発ツール	高速回路シミュレータ Scideam SCALE グラフツール Eschart
HP	https://www.smartenergy.co.jp/



私たちの使命

開発現場から世界を変える

パワーエレクトロニクス分野、スイッチング電源分野を加速させるために、
開発環境の提供、開発の支援をします

まとめ

どちらにも得意不得意があります
シミュレータの特徴を良く理解して使う必要があります

各シミュレータの得意不得意は、シミュレータの設計コンセプトに依存しています
これを理解して使用するとモデリングが、ぐっと上達します

エラーの発生原因と対処法は、シミュレータの演算アルゴリズムによるので、
これを理解したうえで取り組むと解決が早いです

Scideamはこれからも安心してご利用いただけるよう、
機能改善、サポート充実に努めてまいります



Scideam

サ イ デ ィ ー ム

パ ワ エ レ 向 け 高 速 回 路 シ ミ ュ レ ー タ

無償版・30日間フルパッケージ試用
以下のページからダウンロードください

<https://www.smartenergy.co.jp/service/scideam-freetrial/>

お問合せ先

株式会社スマートエナジー研究所

住所：神奈川県横浜市港北区新横浜2-12-1

HP：<https://www.smartenergy.co.jp/>

TEL：045-620-0330

お問合せページ

<https://www.smartenergy.co.jp/contact.html>

mail SE研カスタマーサポート

cs_sel@smartenergy.co.jp