## Stabilitätsanalyse von Leistungsmodulen mithilfe von Q3D Extractor



Matthias Spang, Günter Katzenberger

SEMIKRON Elektronik GmbH & Co. KG

matthias.spang@semikron.com

ANSYS Electronics Simulation Conference, 10.02.2015, München



### Inhalt

- 1. Einleitung und Motivation
- 2. Qualitative Untersuchung selbständig anschwingender Oszillationen an einem Beispiel
- 3. Stabilitätsanalyse einer vereinfachten Ersatzschaltung
- 4. Verwendung der L-Matrix aus ANSYS Q3D Extractor für die Stabilitätsanalyse
- 5. Zusammenfassung und Grenzen der Stabilitätsanalyse



### Inhalt

#### 1. Einleitung und Motivation

- 2. Qualitative Untersuchung selbständig anschwingender Oszillationen an einem Beispiel
- 3. Stabilitätsanalyse einer vereinfachten Ersatzschaltung
- 4. Verwendung der L-Matrix aus ANSYS Q3D Extractor für die Stabilitätsanalyse
- 5. Zusammenfassung und Grenzen der Stabilitätsanalyse



# Halbbrückenschaltung in der Leistungselektronik

- Einsatz z.B. in Umrichterschaltungen
- Die beiden Halbleiterschalter werden wechselweise ein- und ausgeschaltet.
- Häufig besteht ein Schalter aus mehreren parallelgeschalteten Halbleiterchips.
- Beispiel: IGBT-Modul mit  $U_{DC}$ =1000V,  $I_{L}$ =500A, Schaltfrequenz=3kHz
- Insbesondere während der Schaltvorgänge können unerwünschte elektrische Oszillationen auftreten.
- Folgen können Schäden an der Schaltung (z.B. durch Überspannungen) oder EMV-Probleme sein.





FORMS.1014 / Rev. 06

# Selbständig anschwingende LC-Oszillationen

- Frequenzbereich: ca. 5MHz 50MHz
- Durch Einkopplung der Oszillation in die Gatespannung wird das System instabil.
- Die Schwingung muss prinzipiell nicht vom Frequenzspektrum der Schaltflanke angeregt werden.
- Die Bedingungen für die Instabilität treten häufig während der Schaltvorgänge auf.



# Selbständig anschwingende LC-Oszillationen

- Beispiel: Einschaltvorgang dreier parallelgeschalteter IGBT-Schalter
- Simulationsergebnis einer transienten Simplorer-Simulation, die ein induktives
  Ersatzschaltbild aus Q3D Extractor sowie Modelle der Halbleiterbauelemente enthält
- Es sind selbständig anschwingende, gegenphasige Schwingungen zwischen den parallelen Schaltern zu beobachten.





FORMS.1014 / Rev. 06

## Parasitäre Kapazitäten und Induktivitäten

- Das dynamische Verhalten der Schaltung wird stark von parasitären Induktivitäten und Kapazitäten beeinflusst.
- Chipkapazitäten sind stark abhängig von Strömen und Spannungen und daher beim Schalten stark zeitabhängig.
- Parasitäre Kapazitäten von Halbleitermodulen sind daher schwierig zu ermitteln.
- Die parasitären Induktivitäten werden von der Geometrie des Modulaufbaus bestimmt.
- Die Berechnung der Induktivitäten kann durch numerische elektromagnetische Simulation erfolgen, in diesem Fall mit ANSYS Q3D Extractor.



#### Motivation

- Simulationen sollen helfen, parasitäre Oszillationen zu verhindern.
- Aufgrund der schwierig bestimmbaren, zeitabhängigen Chipkapazitäten ist eine verlässliche Vorhersage von Oszillationen problematisch.
- Dennoch können Simulationen Aussagen über die Einflüsse verschiedener Parameter auf die Schwingneigung liefern.



### Inhalt

- 1. Einleitung und Motivation
- 2. Qualitative Untersuchung selbständig anschwingender Oszillationen an einem Beispiel
- 3. Stabilitätsanalyse einer vereinfachten Ersatzschaltung
- 4. Verwendung der L-Matrix aus ANSYS Q3D Extractor für die Stabilitätsanalyse
- 5. Zusammenfassung und Grenzen der Stabilitätsanalyse



# Gemessene selbständig anschwingende LC-Oszillationen

 Beispiel: Gegenphasige Schwingungen der Ströme an den Terminals zweier parallelgeschalteter DCBs nach dem Einschalten des Top-Schalters, f≈8MHz





ANSYS Electronics Simulation Conference ,10.-11. Februar 2015, München







- Prinzipieller Aufbau des Moduls:
  Die Hilfsanschlüsse der DCBs sind über die Treiberplatine verbunden.
- Hier Betrachtung des Top-Schalters





ANSYS Electronics Simulation Conference ,10.-11. Februar 2015, München

www.semikron.com

FORMS.1014 / Rev. 06

- Serienresonanzkreis auf der Treiberplatine
- z.B. mit  $C_{Gext}{=}10nF\!\!, \ L_{PCB}{=}16nH \rightarrow f_r{=}13MHz$





ANSYS Electronics Simulation Conference ,10.-11. Februar 2015, München



Verringerung / Verhinderung der Schwingungen:

- Gleichtakt-Drossel auf der Treiberplatine
- Dioden seriell zu Gatewiderständen
- Externe Gatekapazität zu den Gatewiderständen versetzen
- Externe Gatekapazität verringern / weglassen
- Größere externe Gatewiderstände

(Ergebnisse von Messungen und von Schaltungssimulationen mit ANSYS Simplorer)





Verringerung / Verhinderung der Schwingungen:

- Gleichtakt-Drossel auf der Treiberplatine
- Dioden seriell zu Gatewiderständen
- Externe Gatekapazität zu den Gatewiderständen versetzen
- Externe Gatekapazität verringern / weglassen
- Größere externe Gatewiderstände

(Ergebnisse von Messungen und von Schaltungssimulationen mit ANSYS Simplorer)





Verringerung / Verhinderung der Schwingungen:

- Gleichtakt-Drossel auf der Treiberplatine
- Dioden seriell zu Gatewiderständen
- Externe Gatekapazität zu den Gatewiderständen versetzen
- Externe Gatekapazität verringern / weglassen
- Größere externe Gatewiderstände

(Ergebnisse von Messungen und von Schaltungssimulationen mit ANSYS Simplorer)





Verringerung / Verhinderung der Schwingungen:

- Gleichtakt-Drossel auf der Treiberplatine
- Dioden seriell zu Gatewiderständen
- Externe Gatekapazität zu den Gatewiderständen versetzen
- Externe Gatekapazität verringern / weglassen
- Größere externe Gatewiderstände

(Ergebnisse von Messungen und von Schaltungssimulationen mit ANSYS Simplorer)





Verringerung / Verhinderung der Schwingungen:

- Gleichtakt-Drossel auf der Treiberplatine
- Dioden seriell zu Gatewiderständen
- Externe Gatekapazität zu den Gatewiderständen versetzen
- Externe Gatekapazität verringern / weglassen
- Größere externe Gatewiderstände

(Ergebnisse von Messungen und von Schaltungssimulationen mit ANSYS Simplorer)





FORMS.1014 / Rev. 06

Verringerung / Verhinderung der Schwingungen:

- Gleichtakt-Drossel auf der Treiberplatine
- Dioden seriell zu Gatewiderständen
- Externe Gatekapazität zu den Gatewiderständen versetzen
- Externe Gatekapazität verringern / weglassen
- Größere externe Gatewiderstände

(Ergebnisse von Messungen und von Schaltungssimulationen mit ANSYS Simplorer)





## Gemessene verringerte LC-Oszillationen

#### Beispiel aus Messung:

– Reduzierte Schwingung nach Versetzen der Gatekapazitäten zu den Gatewiderständen





### Inhalt

- 1. Einleitung und Motivation
- 2. Qualitative Untersuchung selbständig anschwingender Oszillationen an einem Beispiel
- 3. Stabilitätsanalyse einer vereinfachten Ersatzschaltung
- 4. Verwendung der L-Matrix aus ANSYS Q3D Extractor für die Stabilitätsanalyse
- 5. Zusammenfassung und Grenzen der Stabilitätsanalyse



 Zur weiteren Analyse des Einflusses verschiedener Parameter wird ein einfaches, linearisiertes Netzwerk zweier paralleler Schalter untersucht.





- Die Eigenschwingungen (Polstellen) des Netzwerks werden durch Berechnung der Eigenwerte der Systemmatrix bestimmt.
- Polstellen mit positivem Realteil beschreiben exponentiell anwachsende Oszillationen (instabiles Netzwerk).
- Beispiel: Top, Wanderung der Polstellen bei Variation der Millerkapazität (10pF 10nF)





- Beispiel: Top, Wanderung der Polstellen bei Variation der Millerkapazität (10pF 10nF)
- − Verringerung von  $C_{Gext} \rightarrow h$ öhere Frequenz
- Für C<sub>Gext</sub><140pF verschwindet die Instabilität.





- Beispiel: Top, Wanderung der Polstellen bei Variation der Millerkapazität (10pF 10nF)
- Verschieben von  $C_{Gext} \rightarrow je$  näher am Chip, umso stärker die Schwingung
- Weglassen von  $C_{\text{Gext}}$  und entsprechende Erhöhung von  $C_{\text{GE}} \rightarrow$  keine Schwingung





- Beispiel: Top, Wanderung der Polstellen bei Variation der Millerkapazität (10pF 10nF)
- Einfluss der Aufteilung zwischen  $R_{Gext}$  und  $R_{Gint}$  bei  $R_{Gext}+R_{Gint}=7.0\Omega$ :





### Inhalt

- 1. Einleitung und Motivation
- 2. Qualitative Untersuchung selbständig anschwingender Oszillationen an einem Beispiel
- 3. Stabilitätsanalyse einer vereinfachten Ersatzschaltung
- 4. Verwendung der L-Matrix aus ANSYS Q3D Extractor für die Stabilitätsanalyse
- 5. Zusammenfassung und Grenzen der Stabilitätsanalyse



- Bisher wurde eine stark vereinfachte Ersatzschaltung zur Stabilitätsanalyse herangezogen.
- Wird stattdessen die simulierte Induktivitätsmatrix aus Q3D-Extractor verwendet, können auch die parasitären Induktivitäten komplexerer Module in die Stabilitätsanalyse einbezogen werden.
- Für f>1MHz liefert die AC-Simulation realistische Werte für die parasitären Induktivitäten der interessierenden Module.



Slide - 27 -



- Die Ersatzschaltung enthält nun das L-Netzwerk aus Q3D sowie weitere lineare Bauelemente (externe Beschaltung, linearisierte Chipmodelle).
- Mithilfe einer Knotenpotentialanalyse wird die Systemmatrix A aufgestellt, deren Eigenwerte die gesuchten komplexen Eigenfrequenzen des Netzwerks liefern.





FORMS.1014 / Rev. 06

- Beispiel: Top, Wanderung der Polstellen bei Variation der Millerkapazität (10pF 10nF)
- Modul mit 3 parallelgeschalteten DCBs
- Bauelementwerte (Treiber, Chips) wie bei vereinfachtem Netzwerk





- Beispiel: Top, Wanderung der Polstellen bei Variation der Millerkapazität (10pF 10nF)
- Einfluss der Aufteilung zwischen  $R_{Gext}$  und  $R_{Gint}$  bei  $R_{Gext}+R_{Gint}=7.0\Omega$ :
- Ähnliche Ergebnisse wie mit vereinfachtem Netzwerk







- Beispiel: Top, Wanderung der Polstellen bei Variation der Millerkapazität (10pF 10nF)
- Durch die direkte Einbindung der Induktivitätsmatrizen aus Q3D lassen sich auch die Auswirkungen von Geometrieänderungen untersuchen (Änderung der Induktivitäten).
- Im dargestellten Beispiel wurde eine zusätzliche Verbindung zwischen den AC-Terminals eingefügt.





### Inhalt

- 1. Einleitung und Motivation
- 2. Qualitative Untersuchung selbständig anschwingender Oszillationen an einem Beispiel
- 3. Stabilitätsanalyse einer vereinfachten Ersatzschaltung
- 4. Verwendung der L-Matrix aus ANSYS Q3D Extractor für die Stabilitätsanalyse
- 5. Zusammenfassung und Grenzen der Stabilitätsanalyse



## Zusammenfassung

- Selbständig anschwingende Oszillationen über die Treiberplatine wurden beobachtet.
- Durch Weglassen der externen Gatekapazität wurde die Schwingung eliminiert.
- Zur Analyse der Schwingungen können die Eigenschwingungen (Polstellen) linearisierter Netzwerke herangezogen werden.
- Einflüsse von Geometrieänderungen können untersucht werden, indem Induktivitätsmatrizen aus Q3D Extractor in die Stabilitätsanalyse einbezogen werden.



#### Grenzen der Stabilitätsanalyse

- Eine verlässliche Vorhersage von Oszillationen scheitert vor allem an unzureichender Kenntnis des dynamischen Verhaltens der Chips, insbesondere der parasitären Kapazitäten bipolarer Bauelemente.
- Eine Berücksichtigung der parasitären Widerstände würde die Stabilitätsanalyse aufgrund des Skineffekts deutlich komplizierter machen.
- Die beschriebene Stabilitätsanalyse liefert keine Aussage darüber, wie lange sich eine Schaltung in einem instabilen Zustand befindet.
- Aus dem gezeigten Beispiel lassen sich keine allgemeingültigen Aussagen ableiten. Je nach Aufbau können auch andere Schwingungsmodi auftreten, die wieder neu untersucht werden müssen.





