T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	パワーデバイスモデルと電気・熱連成解析を適用した電力変換器の高信頼性化に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	堀口剛司
Author(English)	Takeshi Horiguchi
出典(和文)	学位:博士（工学）, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9630号, 授与年月日:2014年9月25日, 学位の種別:課程博士, 審査員:赤木　泰文,安岡　康一,高橋　宏治,藤田　英明,竹内　希
Citation(English)	Degree:, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9630号, Conferred date:2014/9/25, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

（博士課程）
Doctoral Program

論 文 要 旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	電気電子工学　　専攻	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士　（　工学　） Doctor of
学生氏名： Student's Name	堀口剛司	指導教員（主）： Academic Advisor(main)	赤木泰文
		指導教員（副）： Academic Advisor(sub)	

要旨（和文 2000 字程度）
Thesis Summary（approx.2000 Japanese Characters ）

本論文は，「パワーデバイスモデルと電気・熱連成解析を適用した電力変換器の高信頼性化に関する研究」と題し，電力変換器の高信頼性化について，パワーデバイスモデルと電気・熱連成解析を用いた検討を行っている。パワーデバイスを並列接続して構成される電力変換器の設計指針，短絡動作に対する高速保護回路，及び，電力変換器動作中のパワーデバイス温度のリアルタイム評価法を提案し，その有効性を実験によって検証したものである。本論文は以下に記す 8 章で構成されている。

第 1 章「序論」では，パワーデバイスの発展経緯と電力変換器の高信頼性化実現における電気・熱連成解析技術の重要性を概説している。さらに，パワーデバイスの高電流密度化に伴う高速短絡保護の必要性について言及し，電力変換器の小型化実現のためのパワーデバイス温度の設計段階における予測と実験による評価の重要性を指摘している。

第 2 章「関連技術動向」では，パワーデバイスの物理モデルの発展経緯，短絡保護回路および電力変換器の寿命予測方法について，国内外における研究動向と技術的課題について概説している。また，本論文との関連性と相違点について考察し，本論文の本研究の位置付けを明確化している。

第 3 章「パワーデバイスモデルの構築」では，先行研究を参考にしつつ，両極性拡散方程式に基づいた pin ダイオードと IGBT に対する物理モデルを，回路シミュレータを用いて独自に構築している。IGBT モデルを作成する際に必要となるパラメータのうち，電圧依存性が大きくスイッチング動作時に大きな影響を与えるコレクタ・ゲート間容量について実験的導出方法について詳述している。構築した IGBT 物理モデルは，出力特性については 7%，スイッチング損失については 18%以内の誤差率で実験結果を再現している。

第 4 章「パワーデバイスモデルを用いた並列接続動作解析」では，　パワーデバイスモデルを用いたシミュレーションを行い，pin ダイオード，IGBT それぞれの並列接続動作について，配線インダクタンス差やデバイス特性差などの特定の動作条件下で発生する過渡的な電流アンバランスの原因をパワーデバイス内部における過剰キャリアの挙動に基づき理論的解釈を示した。

第 5 章「IGBT 物理モデルを用いた電気・熱連成解析」では，IGBT 物理モデルを用いた電気・熱連成解析を用い，IGBT を並列接続した際の各 IGBT の接合温度を定量的に評価した。特に，接合温度差と配線インダクタンス差との関係を明らかにすることにより，電力変換器の主回路あるいはパワーモジュール内部の配線構造の設計指針を容易に決定できる。また，短絡動作時における接合温度の評価も実施した。短絡動作時のデバイス温度は実験的評価が困難であるため，短絡保護回路の設計に対して極めて有効である。このように，電力変換器の高信頼性設計に対する，高精度な IGBT 物理モデルを用いた電気・熱連成解析技術の有効性を示した。

第 6 章「IGBT 物理モデルを用いた短絡保護回路開発」では，パワーデバイスモデルを用いたシミュレーションにより，ゲート電荷特性を利用した高速短絡保護を提案・設計するとともに，提案回路の妥当性を実験により検証した。その結果，アーム短絡については 1μs 以下での検出を実現し，負荷短絡についても実用的に十分高速に短絡保護を実現した。ゲート電荷特性は，スイッチング動作時におけるゲート・エミッタ間電圧とゲート電荷量の関係であるため，その特性はデバイス自身で決まり，スイッチング速度に依存しないため，短絡検出タイミング期間の設定が不要となる。また，高価な検出器も不要であるため，高速，安価，シンプルな回路構成となる短絡保護回路を実現した。

第 7 章「電気・熱連成解析技術のリアルタイム化」では，寿命設計（長期的信頼性評価）に不可欠な，パワーデバイス温度の評価方法について，電気・熱連成解析技術とリアルタイムコンピューティング技術を組み合わせたリアルタイム電気・熱連成解析システムを提案・開発した。電力変換器を用いて実際にモータを駆動した際における IGBT 及び還流ダイオードの温度をリアルタイムに評価し，同時に測定した赤外線カメラによる測定結果と比較している。その結果，4%の誤差で一致しており，リアルタイム電気・熱連成解析システムの妥当性・有効性を検証した。

第 8 章「結論」では，本研究で得た知見・成果を要約し，今後の課題について言及している。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。
Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ（T2R2）にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

（博士課程）
Doctoral Program

論 文 要 旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	電気電子工学　　専攻	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士　（　工学　） Doctor of
学生氏名： Student's Name	堀口剛司	指導教員（主）： Academic Advisor(main)	赤木泰文
		指導教員（副）： Academic Advisor(sub)	

要旨（英文 300 語程度）
Thesis Summary（approx.300 English Words ）

This dissertation describes a high-reliable power converter design by combining a physics-based power device model and an electro-thermal simulation model. The author constructs a physics-based power device model based on the ambipolar diffusion equation, and applies it to the following three topics: 1) design guide of power converters which consist of power devices connected in parallel, 2) design and verification of a high-speed protection circuit for IGBTs subjected to short-circuit faults, and 3) real-time estimation of a junction temperature of a power device under actual operating conditions.

1) The author simulates a junction temperature of each IGBT connected in parallel under various wiring inductance mismatches and shows the dependence of temperature differences on wiring inductance differences. Besides, the author estimates a junction temperature of each IGBT under short-circuit conditions. Since experimental estimation of the junction temperature is hardly possible, the electro-thermal simulation with the physics-based IGBT model is useful for developing a short-circuit protection circuit.

2) A high-speed protection circuit against short-circuit faults is developed. The circuit design is based on a gate charge characteristic. Simulation and experiment confirm that the proposed method is fast enough to detect short-circuit faults from a practical point of view. Experimental results show that it detected a hard-switching fault within about 1 μs after the collector current started flowing through the IGBT, and detected a fault-under-load when the collector current reached its peak value.

3) A real-time electro-thermal simulation system has been developed. It can estimate a junction temperature of each IGBT and free-wheeling diodes under the actual operating conditions. Simulated results are in excellent agreement with experimental results by using an infra-red camera within a tolerance of 4%.

This dissertation verifies the effectiveness of the physics-based power device model and electro-thermal simulation for high-reliable power converter design.

備考 ： 論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。
Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ（T2R2）にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).