

学位論文題名

A Study on Three-Phase Series-Connected
Hybrid Multi-Converter Systems

(三相直列多重ハイブリッド変換器に関する研究)

学位論文内容の要旨

本研究では、変換器出力の高調波を低減しつつ大容量化を図る方法として、三相直列多重ハイブリッド変換器を提案している。この変換器は、従来の多重変換器の欠点を克服するべく、IGBT素子の高速動作性に着目し、大容量GTO素子を用いた変換器と、高速動作により高調波低減が可能なIGBT変換器との直列多重化を行う、新しい変換器システムを提案するものである。

近年、さまざまな分野で電力変換器の大容量化が望まれている。大容量システム向けに実用化されたGTO、中小容量向けで高周波スイッチング可能なIGBTなどいずれも自己消弧能力を持つ素子が開発され、大容量変換器システムの大部分がこのGTOあるいはIGBTで構成されている。さらにこれらの素子の登場に伴い、大容量の電力変換器まで小容量で得られたものと同等の高性能が要求されるようになってきている。

GTO素子はスイッチングロスが大きく、スイッチング周波数を高く設定することができない。従って、低いスイッチング周波数で可能な限り出力の高調波成分を低減しなければならなくなる。IGBTなどの高速動作が可能な素子はそのままでは大容量変換器の使用には適せず、大容量変換器での高速スイッチングによる高調波低減は困難である。そこで、素子の性能に頼らず、変換器回路の構成方法により高調波を低減させる方法が検討され、「変換器の多重化」という技術が使われるようになった。具体的には、いく台かのユニット変換器を組み合わせる一つのシステムを構成するものである。多重化の効果として、出力電圧レベル数が増加し出力波形の改善が可能となるが、GTO素子の低速スイッチングにより低次の高調波が発生してしまう。

本研究では、複数台の2レベルGTO変換器と、1台の3レベルNPC形IGBT変換器を直列多重化した、直列多重ハイブリッド変換器システムを提案する。GTO変換器はスイッチングロスを最小化するために出力交流側の周波数でスイッチングさせ、合成出力電圧のベースとなるマルチレベル電圧を出力させる。一方、IGBT変換器は高周波スイッチングでPWM制御させ、合成出力電圧の追加分を分担するだけでなく、高速スイッチング特性を活かし、GTO変換器の出力する高調波を相殺する電圧をも出力させる。以上の構成および動作により、多重変換器システムの大容量化、高調波成分の低減化、さらにデバイスロスの低減化が同時に可能となる特長がある。

提案する三相直列多重ハイブリッド変換器を検証するため、シミュレーションにより出力特性の検討を行い、本変換器をインバータ、整流器、およびSTATCOMとして動作させた場合の電圧電流の制御法を構築し、それぞれの動作について実験を行い、有効性を確認している。

本論文の各章における具体的な内容は以下の通りである。

まず、第1章では大容量電力変換器の応用と回路構成について紹介している。具体的には、実用されている多重電力変換器、マルチレベル変換器と、Hブリッジ形直列多重変換器について説明している。

第2章では、多重変換器とマルチレベル変換器の主回路、制御方式及び出力特性について述べている。その上で、多重ハイブリッド変換器システムの構成と基本原理を提案している。

第3章では、第2章で提案した多重ハイブリッド変換器の最小システムとして、1台のGTO変換器と1台のIGBT NPC（中性点クランプ形）変換器を組み合わせた、2多重ハイブリッド変換器を対象として、回路構成と電圧電流制御法について検討している。PSIMやMATLABなどのシミュレーションツールを用いて、出力波形、電圧調整範囲、高調波ひずみ率など出力特性が詳細に検討されている。最後に本変換器のインバータ、整流器、およびSTATCOMとしての動作それぞれについて実験し、有効性を確認している。

第4章では、 n 台のGTO変換器と1台のIGBT変換器を組み合わせた $n+1$ 多重ハイブリッド変換器を考察し、 $n=2$ の場合（3多重）の回路構成、変圧器の結線方式と出力電圧波形、ひずみ率および出力電圧範囲の拡大方法について詳細に検討している。シミュレーションと実験を通して、 $n+1$ 多重ハイブリッド変換器の有効性を確認している。

第5章では、提案する三相直列多重ハイブリッド変換器の有効性を定量的に確認するため、ハイブリッド変換器と、GTO素子のみで構成した同一の2レベルPWM変換器を直列に2多重したシステムと、IGBT素子のみで構成される3レベルNPC形PWM変換器を直列に2多重したシステムについて、最大出力容量、デバイスロスに対する比率、出力電流歪み率の比較をシミュレーションと計算により検討し、ハイブリッド方式の有利性を示している。

第6章では、提案する三相直列多重ハイブリッド変換器のSTATCOMへの応用について述べている。まず補償電流と直流電圧制御法を検討し、提案する直列多重ハイブリッド変換器を用いたSTATCOMでは、補償電流が大きく変化した場合、IGBT変換器のPWM制御が、過変調領域で動作し易く、その結果補償電流がひずむという問題点を指摘している。この問題点を解決する方法として、「可変直流電圧制御法」を提案している。提案する制御法を利用したSTATCOMでは、直流電圧が補償電流と電源電圧によって適応的に調節され、補償電流が大幅に変化しても、補償電流のひずみが少なく、補償可能な電流変化範囲を拡大することができる。実験結果により、直列多重ハイブリッド変換器を利用すれば、大容量でかつ低損失、低ひずみの電流を出力できる、新たなSTATCOMを実現できることを確認している。

第7章は、本論文のまとめである。各章で得られた結果を総括すると共に、提案する三相直列多重ハイブリッド変換器の具体的な応用と今後の課題について説明している。

学位論文審査の要旨

主査 助教授 福田 昭 治
副査 教授 大西 利 只
副査 教授 本間 利 久
副査 教授 五十嵐 一

学位論文題名

A Study on Three-Phase Series-Connected Hybrid Multi-Converter Systems

(三相直列多重ハイブリッド変換器に関する研究)

「省電力・省エネルギー」を目指して、交流電動機の可変速ドライブが普及した。これに伴い電力変換器の使用台数が増加し、発生する高調波の電力系統に及ぼす影響が問題になり、1994年資源エネルギー庁から「高調波抑制対策ガイドライン」が通達された。

既存設備の送電容量を増加させる装置として、さまざまな電力制御装置が採用されつつある。例えば、通過電力潮流を制御するUPFC、無効電流抑制を行うSTATCOMなどがある。また、ピーク電力対策や系統安定化に寄与する電力貯蔵システム、再生可能エネルギー源の、風力や太陽光発電などがある。前者で用いられる電力制御装置は、電力変換器に他ならず、後者では電力系統とのインタフェースとして電力変換器が不可欠である。これら電力系統への電力変換器の適用は対象電力容量が大きく、制御が容易でないという共通した特徴がある。

大容量システム向けデバイスとしてGTO、中小容量向けで高周波スイッチングデバイスとしてIGBTが開発されている。GTOは大容量変換器の大部分で利用されるが、スイッチング損失が大きく、スイッチング周波数を高く設定できない。そこで「変換器の多重化」技術が使われるようになった。多重化とは、複数のユニット変換器を組み合わせる一つのシステムを構成するもので、出力波形の改善が可能となるが、低次の高調波が依然として多く残る。この場合、高調波対策用の大容量コンデンサ・リアクトルよりなる同調フィルタの設置が必要となる。

本論文では電力変換器の大容量化、出力における高調波ひずみの最小化、さらにデバイス損失の最小化を通しての変換効率の向上を目的とした、「直列多重ハイブリッド変換器」を提案している。本論文には以下のような顕著な成果が認められる。

第一に、多重ハイブリッド変換器という新しい概念を提案している。GTO変換器とIGBT変換器という、異なる変換器を組み合わせる多重化であり、GTO変換器は方形波スイッチングでベース電圧を出力、IGBT変換器はPWMスイッチングで高調波の相殺と追加分の電圧を出力させる。GTO変換器のスイッチング損失を最小に、出力電圧を最大にすることができ、IGBT変換器によって合成出力電圧の制御が可能になるとともに、高調波ひずみを最小化できる。上記の三つの目的を同時に達成できる、極めて有用な構成法である。

第二に、最も単純な2多重ハイブリッド変換器を対象に、それぞれの変換器の電圧制御法を提案、変圧器の結線法による出力電圧とひずみの程度を比較検討している。1.5kWのインバータを試作して実験を行い、シミュレーション通りの結果が得られることを確認している。整流器およびSTATCOM運転における実験波形を示し、力率1の正弦波の電源電流が得られることを確認している。これらはハイブリッド変換器の有用性を実験的に証明したもので重要な成果である。

第三に、多重度を一般化した、 n 多重ハイブリッド変換器の特性を議論している。各変換器の構成法として、 $n-1$ 台のGTO変換器は出力に互いに $\pi/6(n-1)$ の位相差を設けること、変換器結線を Δ -千鳥結線として、互いの位相差 $\pi/6(n-1)$ をキャンセルするように千鳥結線の巻数比に設計することを提案している。さらに、多重数 n を変えたときの各特性がどのように変わるかをシミュレーションで検討し、3多重とするのが最も特性の改善に効果的であることを明らかにしている。その結果を受けて3多重ハイブリッド変換器を対象に、電圧制御法を具体的に提案し、1kWの試作機を作製、インバータ運転、整流器運転、STATCOM運転について詳細な実験を行い、3多重ハイブリッド変換器の有効性を確認している。これらは、ハイブリッド変換器を実用化する場合の、重要な指標を与えるものである。

第四に、3多重ハイブリッド変換器をSTATCOMとして利用した場合について議論している。問題点として、負荷が大幅に変化したとき、IGBT変換器が過変調領域で動作し、出力電圧のひずみが増加することを指摘し、これを解決する方法として「可変直流電圧制御法」を提案している。1kVAの試作器を作製して実験を行い、電源電流が力率1の正弦波となること、PCC電圧が負荷の影響で変化しても、一定の目標値に制御できることを確認している。これらは、ハイブリッド変換器が電力の品質向上にも有用であることを証明している。

以上のように、多重ハイブリッド変換器が大容量の電力変換器に適した構成であることを明らかにしており、実用化が大いに期待できる。

これを要するに、著者は、電力変換器の大容量化を可能とする、多重ハイブリッド変換器を提案し、インバータ、整流器、STATCOMとして動作させて場合の電圧・電流制御法を提案、シミュレーションおよび試作機による実験によって、有用性を確認しており、電気機器学、電力工学に対して貢献するところ極めて大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。