



Title	モジュラー・マルチレベル方式電力系統用大容量電力変換器の実用化に関する研究
Author(s)	中村, 文則
Citation	大阪大学, 2021, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/82240">https://doi.org/10.18910/82240</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏名（中村文則）	
論文題名	モジュラー・マルチレベル方式電力系統用大容量電力変換器の実用化に関する研究
論文内容の要旨	
<p>近年、環境負荷低減を目的として、再生可能エネルギーを利用した発電電力の割合が増加しつつあり、2035年頃までの各国目標によると、その割合は22%から60%に達することが見込まれる。これら再生可能エネルギーの多くが太陽光や風力といった短時間での変動が大きな自然エネルギーによって占められており、交流電力系統に電圧変動や周波数変動といった不安定現象を発生させる課題がある。</p> <p>上記交流電力系統の不安定性を解決するために、自励式変換器を適用した無効電力補償装置(STATCOM: STATic synchronous COMpensator)やHVDC(High Voltage DC transmission), BTB(Back-To-Back)といった有効電力融通装置が用いられる。</p> <p>近年、サブモジュール(SM: SubModule)もしくはセルと呼ばれる単相の半導体変換器を直列に接続する構成を特徴とするモジュラー・マルチレベル変換器(MMC: Modular Multilevel Converter)が開発されており、発生高調波が小さいため高調波フィルタを小容量化もしくはなしとできる、SM数が容易に設計変更できるため大容量化が容易で冗長設計も容易である、自励式変換器であるため高速応答が可能であり有効電力と無効電力を独立に制御可能である、といった優れた特徴がありSTATCOM, HVDC, BTBへの適用が望まれる。</p> <p>しかしながら、実用化に際しては、弱小系統への導入に関する制御上の課題、全SMごとに独立した直流コンデンサを備えていることに起因した制御上および工場試験や現地試験上の課題、ならびにSMが直列接続されていることによる高電圧に起因した課題がある。</p> <p>本研究は、MMC方式電力系統用大容量電力変換器の実用化に関する上記課題についての研究成果をまとめたもので、以下のとおり構成される。</p> <p>第1章では、本研究の背景として、世界の再生可能エネルギー発電の動向とその結果発生する諸問題を検討し、解決策としてのMMC方式電力系統用大容量電力変換器の実用化に際しての検討課題を導出した。また、本研究の目的を明らかにした。</p> <p>第2章では、MMC方式STATCOMにおける系統安定化に関して、AC-AVR制御系の設計方法を検討した上で、弱小系統接続時の自動ゲイン変更制御、単独系統移行時の待機時間制御についても検討し、リアルタイムシミュレータ試験ならびに装置を用いた現地試験で所望の効果が得られることを明らかにした。</p> <p>第3章では、MMC方式STATCOMにおける、交流電力系統への影響が小さい工場試験方式ならびに現地試験方式について検討し、工場での通電試験ならびに装置を用いた現地試験にて所望の試験が可能であることを明らかにした。</p> <p>第4章では、MMC方式BTBにおける、直流地絡発生時に直流短絡に至らない接地方式ならびにその回路定数の条件について検討し、変圧器の変換器側中性点に鉄心入り接地リクトルと直列接続抵抗を用いた実用化設計手法を提案し、瞬時値解析によりインダクタンス条件ならびにとり得る抵抗値の範囲を明らかにした。</p> <p>第5章では、本研究の総括を行い、MMC方式電力系統用大容量電力変換器の実用化に関する今後の課題について述べた。</p>	

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 中村 文則 )		
	(職)	氏 名
	主 査 教授	高井 重昌
論文審査担当者	副 査 教授	舟木 剛
	副 査 教授	牛尾 知雄
	副 査 教授	白神 宏之
	副 査 招へい教授	阪部 茂一

## 論文審査の結果の要旨

近年、環境負荷低減を目的として、再生可能エネルギーを利用した発電電力の割合が増加しつつあり、これら再生可能エネルギーの多くが太陽光や風力など短時間での変動が大きな自然エネルギーによって占められているため交流電力系統に電圧変動や周波数変動といった不安定現象を発生させる課題がある。交流電力系統の安定性は、交流電力系統全体の送電機能に影響を与えるとともに、需要家負荷機器へも影響を与える。従って交流電力系統の不安定現象は望ましくない。交流電力系統の不安定現象を解決するために、その手段としてSVC(Static Var Compensator)および変圧器多重方式STATCOM(STATIC synchronous COMPensator)といった無効電力補償装置や、他励式のHVDC(High Voltage Direct Current), BTB(Back-To-Back)といった有効電力融通装置が用いられてきた。これら機器にて一定の導入効果は得られるものの、SVCでは高調波の発生により相当容量の高調波フィルタが必要で応答速度が遅い、変圧器多重方式STATCOMでは変圧器の偏磁過電流により保護停止が発生することおよび多重変圧器の製作制約のため大容量化に限界がありかつ多重変圧器一次側が直列結線されており冗長設計が容易でない、他励式のHVDCやBTBでは無効電力調相設備および高調波フィルタが必要で無効電力の制御ができない、といった問題点がある。そこで本研究では、サブモジュール(SM: SubModule)もしくはセルと呼ばれる単相の半導体変換器を多数台直列接続する構成のモジュラー・マルチレベル変換器(MMC: Modular Multilevel Converter)によってこれらの課題を解決する手法に着目している。モジュラー・マルチレベル変換器は発生高調波が少ないため高調波フィルタの小容量化あるいは無しとすることができ、かつ高速応答である、変圧器の偏磁がほとんど発生しない、大容量化が容易、冗長設計が容易であるといった特徴がある。この方式についてこれまでに主回路についてはSMの接続方法に関する検討およびSMの回路構成に関する検討、制御方式についてはSMの直流電圧の制御方式や循環電流の制御などについて検討がなされている。しかしながら、実用化にあたっては弱小系統に導入する際の制御面での課題、各SMの直流コンデンサが独立していることに起因する課題、各SMを合計した直流電圧が高電圧となることに起因する接地方式などの課題を解決する必要があるが、これら実用化のための課題に対する解決方法は明らかにされていない。

そこで本研究では、制御面の課題については、弱小系統接続時の交流電圧制御系の安定性の評価と自動ゲイン変更制御を検討し、リアルタイムシミュレータ試験で所望の効果が得られることを明らかにしている。また、直流コンデンサが独立していることに起因した課題については、単独系統移行時の待機時間制御について検討し、リアルタイムシミュレータ試験で所望の効果が得られることを明らかにしている。さらに交流電力系統への影響が小さい工場試験方式ならびに現地試験方式について検討し、実用装置を用いた工場試験ならびに実系統の現地試験結果より、所望の試験が可能であることを明らかにしている。また、直流電圧が高電圧化されることによる課題については、BTB構成において、直流地絡発生時に直流短絡に至らない接地方式ならびにその回路定数の条件について検討し、変圧器の変

換器側中性点に鉄心入り接地リアクトルと直列接続抵抗を用いた設計手法を提案し、回路解析と瞬時値シミュレーションによりインダクタンスならびに抵抗値のとり得る条件を明らかにしている。結果、MMC方式電力系統用大容量電力変換器の実用化に際して実系統での制御面、装置の試験方法、接地方式での課題を解決し、実用化装置に寄与している。本研究により得られた結果は以下のとおりである。

(1) MMC 方式STATCOMにおける系統安定化に関して、AC-AVR(AC-Automatic Voltage Regulator)制御系の設計方法を検討した上で、弱小系統接続時の自動ゲイン変更制御を実用化装置に組み込んで系統の短絡容量比変化時においても不安定性を自動的に解消するような制御を実現している。単独系統移行時の待機時間制御については、従来方式では待機時間で最長3秒程度が限界であったものを10.8秒まで延長できることを示している。これらの制御の性能検証を高速計算機と実制御装置の連携によるリアルタイムシミュレータによって行った後、制御系を実装した実用装置を用いた実系統試験では装置全体として所望の制御結果が得られることを示している。

(2) MMC 方式STATCOM における交流電力系統への影響が小さい工場試験方式については、SMが5個からなるMMC変換器2台を交流端子で接続し、無効電流を相殺することで系統に無効電流を流出させない試験方法を考案し性能試験を行っている。実系統の現地でのシステムチェック試験では、STATCOM バルブを一旦系統に接続しSM直流コンデンサを充電、制御装置との通信を確立させたのち、系統連系の遮断器を開放した状態でSTATCOM のデルタ結線に循環電流を流す試験方法を考案し行っている。同試験方法にて、事前に工場で実施したリアルタイムシミュレータ試験の波形と同一の結果が得られ、主回路、SMと変換器制御盤間の通信、および変換器制御盤の動作検証を行っている。これらの結果から本試験方法により、系統への影響を与えることなくMMC方式STATCOMのシステムチェック試験の実施が可能であることを示している。

(3) 自励式BTBシステムの接地方式の比較検討を行ったうえで、制御上直流電圧に対する交流出力の利用率を改善するため重畳される三次高調波に対して高インピーダンスでありかつ直流に対して低インピーダンスとなる変圧器の変換器側中性点接地リアクトルによる接地方式を提案し、その設計手法および小型化方法について論じている。提案の交流側中性点接地リアクトル方式は、直流端子地絡時に直ちに直流短絡とならないとともに、正負直流電圧のアンバランスがほとんど発生しないことを示すと同時に、三次高調波に対するリアクタンス、浮遊キャパシタンスを介しての三次高調波に対するインピーダンス、浮遊キャパシタンスとの共振次数を避けるためのインダクタンスの条件よりインダクタンスの下限値を定めている。また、SM から冷却水を介して大地に接地するまでの電気抵抗（大地漏れ抵抗）より接地抵抗値の上限値を定めている。更に実用化に際して、接地リアクトルの小型化のためには直列抵抗を接続した鉄心入りリアクトルの適用が効果的であることを示し、接地抵抗値の範囲を定めている。これらの結果は計算機による瞬時値シミュレーションにより検証されている。

以上のように、本論文はモジュラー・マルチレベル方式電力系統用大容量変換器の実用化に関する重要かつ貴重な知見を与える内容となっており、この分野の技術の発展に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。