

報告番号	甲 第 12502号
------	------------

主論文の要旨

論文題目 Study on Neutral Point Potential Control based on New Degrees of Freedom for Three Level Neutral Point Clamped Converter (新たな自由度に基づく3レベル中性点クランプ型コンバータの中性点電位制御に関する研究)

氏名 管 勃

論文内容の要旨

人類が持続可能な社会を実現するためには再生可能エネルギーの普及が不可欠である。その普及に向けて、高圧直流送電やスマートグリッドなどの研究が精力的に行われているが、その中でカギとなるのは、中高圧かつ大容量分野において振幅・周波数変換を可能とする電力変換器技術である。電気自動車やエレベーター、エアコンなどの家電・民生分野では、直流電源の正電位と負電位を利用する2レベルコンバータの利用が一般的であるが、3-10kVの中高圧の場合には、three level neutral point clamped (TL-NPC) converter, 10kV以上の超高圧の場合には、multilevel cascaded H-bridge (CHB) converterが使用される。これは、スイッチング素子の耐電圧は(IGBTの場合)最大6.5kVであり、ハードウェア設計におけるマージンを考慮すると、2レベルコンバータは通常3kVまでしか許容できない点によるものである。本論文ではTL-NPC converterを研究対象とする。2レベルコンバータに比べて、TL-NPC converterは各スイッチング素子に要求される耐電圧を半分に低減可能であることから、より高い電圧にも対応可能となる。更に、直流電源の正電位、負電位に加え、中性点電位の三種類の電圧が出力可能であるため、pulse width modulation (PWM)変調技術を利用する際により歪みの少ない正弦波電圧を出力可能である。高調波成分が減少することから、出力側のフィルタも小型化或いは省略可能となる。更に、出力電圧の du/dt も半減し、電磁干渉問題も改善可能である。以上の様な点から、TL-NPC converterは中高圧かつ大容量電力変換において重要な役割を果たしている。

上述のように TL-NPC converter には様々な利点があるが、利用に際して重大な問題点も

存在する。それは、中性点電位の不安定問題である(以降、中性点電位問題と呼ぶ)。TL-NPC converter は、原理的に三種類の電圧($-u_{dc}/2$, 0 , $u_{dc}/2$)を出力可能である。その特長である零電圧は中性点電位を利用して出力するが、電力変換中に中性点電位を決定づける二つのコンデンサが充放電により、変動することが知られている。具体的に、中性点電位問題はドリフト問題と低周波脈動問題に分類できる。ドリフト問題はデッドタイムや負荷の非対称性とスイッチング素子の不一致性などに起因する。この問題を解決しないと、中性点電位が発散しコンデンサとスイッチング素子の破損を招く。低周波脈動問題は各 PWM 変調技術の特性に起因する。この問題を解決するために、TL-NPC converter の体積の $1/4 \sim 1/3$ を占めるコンデンサを設置する必要があるが、コンバータの体積・重量・コストから見ると、望ましくない。中性点電位問題では採用する PWM 変調技術毎に、影響の現れ方が、解決するための制御手法も異なる。これまでに、様々な解決手法が提案されてきたが、未だ未解決な問題が残存する。本論文では、未だ解決されていない以下の 2 つの課題に着目した。

(I) 高スイッチング周波数下、中性点電位のドリフト問題と低周波脈動問題の同時解決

中性点電位のドリフト問題に対して、現在最も使用されている方法は、零相電圧重畳法である。この方法では、三相三線システムにおいて、零相電圧は相電圧に影響を与えるが、線電圧には影響を与えないところに着目し、零相電圧を重畳しながら中性点電位を制御する。しかしながら、変調率が高い動作点に於いて、中性点電位の低周波脈動問題を生じる。この原因は、変調率が高い際に、零相電圧を調整できる範囲が狭く、中性点電位の制御能力を失うためである。この低周波脈動を抑制するために、dual modulation wave (DMW) method では、零相電圧ではなく変調法そのものを修正した。DMW method は本質的に中性点電位に影響がない電圧ベクトルを利用する。よって、中性点電位の低周波脈動問題はそもそも存在しない。利用される電圧ベクトルは中性点電位に影響を与えないが、ドリフト問題に対しての制御能力も存在しない。これは、DMW method が本質的に Open-loop の制御法であることに起因する。DMW method 下のドリフト問題に対して、幾つかの補償法も提案されたが、中性点電位のドリフトの制御性が低下し、両問題を同時に解決することはできていない。

(II) 低スイッチング周波数時の中性点電位低周波脈動問題の解決

より高出力なアプリケーションへの適用に際しては、低スイッチング周波数の変調法の採用が求められる。高出力時にはスイッチングによる損失と発熱量が大きく、スイッチング周波数を下げないと、システム全体の効率も悪く、冷却装置の設計も困難になる。しかしながら、スイッチング周波数を下げると、space vector PWM や sinusoidal PWM などの変調法では、沢山の低次高調波を生じ負荷制御の影響が大きいの。よって、Selective Harmonic Elimination PWM (SHEPWM) や current harmonic minimum PWM (CHMPWM) などの変調法が必要不可欠である。これらの方法は低次高調波を抑制することが可能であるが、SHEPWM や CHMPWM のスイッチングパターンの導出は極めて計算負荷が重く。現状、offline での計算結果を利用した実装が行われる。このため、これらの変調法を操作することで、中性

点電位を制御することは事実上不可能であり、今まで3レベル SHEPWM 変調する際に、中性点電位制御のための自由度が存在しないことは一般的な認識である。

本論文では、着目した以上の二点が TL-NPC converter の普及に向けた重要な課題であると考え、新たな中性点電位制御を提案することを目的とする。

具体的には(I)及び(II)の課題に対して、それぞれ、

(1) 二自由度の全探索に基づく中性点電位制御及び最適な二自由度の直接計算法(提案法 1-1 および提案法 1-2)

(2) 3 レベル SHEPWM 変調下、最適な3次と9次高調波成分の指定に基づく中性点電位低周波脈動の抑制手法(提案法 2)

を提案する。本論文では、まず、(I)の課題に対し、既存法では中性点電位制御に際して、出力電圧に影響のない変調波形生成には一つの冗長さ(1自由度)が存在するとしていたが、本論文では、二自由度存在することを明らかにした。この二つの自由度を積極的且つ独立的に利用することで、中性点電位のドリフト問題と低周波脈動問題の同時解決を図る。具体的には、まず調整可能範囲を解明し、更にこの二つの自由度と中性点電流、PWM 波、switching sequences の関係を解析した。しかし、この関係は複雑であり、解析的に二つの自由度を求めることは容易でない。そこで、全探索により最適な二つの自由度を求める方法を提案した。これを提案法 1-1 とする。既存法に比べ、高い中性点制御能力を持つ提案法 1-1 ではあるが、二自由度を全探索するため、演算量が高い。そこで、二つの自由度と中性点電流の関係が区分線形となる性質を利用した求解法を導出し、探索によらず、直接、最適な二つの自由度を決定する方法を提案する。これを提案法 1-2 とする。これにより、低コストの DSP の利用が可能となる。

次に、(II)の課題に対し、従来、考慮していなかった3次と9次高調波成分を利用し中性点電位の低周波脈動抑制法を提案した。これを提案法 2 とする。実際に、基本波と3次、9次高調波成分に起因する中性点電流は、中性点電位に影響を与える。提案法 2 では、各成分と各成分に起因する中性点電流の関係を解明し、基本波と3次高調波成分に起因する中性点電流が相殺できることを明らかにした。これにより、3次高調波成分を最適な 0.2636 に設定することで、中性点電位の低周波脈動を最小可能であることを示した。一方、9次高調波成分はこのような都合のよい関係がないことを明らかにし、0となる様に設定することが最適であることを示した。提案手法 2 により、3 レベル SHEPWM 変調下の中性点電位低周波脈動問題が初めて解決可能となった。

以下に、本論文の構成と各章での成果を簡潔に示す。

まず、第1章では、本研究の背景および目的について述べた。

第2章では、TL-NPC converter の基本動作原理と中性点電位問題を紹介した後、二つ代表的な中性点電位制御手法を説明した。零相電圧重畳法と DMW method である。更に、二つの方法の問題点を解明し、新たな中性点電位制御手法を検討する重要さを示した。

第3章では、提案法 1-1 を提案した。提案法 1-1 は、二自由度を定義し積極的且つ独立的

に利用する上、既存手法の問題点を克服した。更に、二自由度と中性点電流、PWM 波、switching sequences との関係を解明した。全探索原理を用いて最適な二自由度も簡単に求めた。また、実機実験により、提案法を用いることにより中性点電位のドリフト問題と低周波脈動問題を同時に上手く解決できることを確認した。

第 4 章では、提案法 1-2 を提案した。提案法 1-2 は、提案法 1-1 の演算量問題に着目し、演算量を低減できる直接計算法を検討した。提案法 1-1 の様な全探索ではなく、直接計算により最適な二自由度を見つけた。これを実現するために、二自由度と中性点電流の区分的な線形関係を解明した。実機実験により、提案法 1-2 を用いることにより演算量は提案法 1-1 の 1/30 に低減できることを確認した。従って、低コストの DSP 使用時においても、適用可能である。

第 5 章では、今まで 3 レベル SHEPWM 変調下中性点電位制御が不可能な問題に対して、提案法 2 を提案した。提案法 2 は、意図的に 3 次と 9 次高調波成分を利用し中性点電位の低周波脈動を最小化する。このため、まず 3 次と 9 次高調波成分と中性点電流との関係を解明し、更に 3 次と 9 次高調波成分の最適な振幅値も導出した。最適な 3 次と 9 次高調波成分を、スイッチング角度を計算する前に指定することにより、中性点電位の低周波脈動の最小化を実現した。

第 6 章では、本論文のまとめと今後の課題を示した。

本論文の成果は、既存法では実現できない中性点電位のドリフト問題と低周波脈動問題を両立可能な解決方法を提案した。更に、3 レベル SHEPWM 変調下の中性点電位の低周波脈動を最小化できる手法を初めて提案した。本論文の成果により、TL-NPC converter の普及が期待できる。