フライングキャパシタ形マルチレベルインバータを用いた 直流給配電方式の基礎検討

北條 昌秀* 湊 和幸*

A Basic Study on a DC power network using Flying Capacitor Multilevel Inverter

Masahide Hojo*, Kazuyuki Minato*

Abstract – In modern electrical power system, a lot of apparatus themselves are using or supplying dc power. However, conventional power networks are based on ac power and each apparatus has its optimal dc voltage level for better performance. Therefore, we now employ various types of converters in the network, such as ac/dc or dc/dc converters. Those power converters cannot avoid conversion loss inherently. This paper proposes a configuration of dc power network using a flying capacitor multilevel inverter. The multilevel inverter has an ac terminal and some dc terminals. It used to be considered as some applications where almost sinusoidal ac output is required without a bulk ac passive filter. The different dc voltage terminals are utilized as multiple dc terminals in the dc power supply network. It is also considered that each dc voltage level can be settled at the different value. A typical case operation is confirmed by simulation studies.

キーワード：直流給配電システム，フライングキャパシタ形マルチレベルインバータ，AC/DC コンバータ，DC/DC コンバータ

Keywords : Dc power supply network, flying capacitor multilevel inverter, ac/dc converter, dc/dc converter

1. まえがき

近年、自然エネルギー利用分散電源への注目と期待は益々高まってきている。我国で主要な分散電源の一つとして太陽光発電システムが挙げられるが、そもそも太陽電池の出力は直流であるため、既存の給配電ネットワークに接続するためにはインバータが必須である。一方、負荷として接続される電気機器では、交流を入力として内部で整流回路を通して直流に変換している場合が多い。また、自然エネルギー利用電源は、本質的に出力変動が避けられないため、この平滑化の目的で蓄電池等が設置されるような場合を考えると、その蓄電池は直流で使用される。このように、給配電ネットワークにはパワーエレクトロニクス技術に基づく電力変換装置が多数台用いられており、電源から負荷までの間に多段の変換が行われているのが現状である。

一方、直流による給配電システムが再び注目されてきている^[1]。この背景には、近年のパワーエレクトロニクス技術の発展はもちろんのこと、直流の絶縁技術と回路保護技術や、給配電システムを構成する要素間の通信を容易にするIT 関連の進歩にいたるまで、様々な技術開発の成果がある

ことが挙げられよう。交流を内部回路で整流して使用する既存の電気機器の中には、入力を直流として直接使用可能な機器もあり、低電圧で直流給電を行う方式についても検討がなされている^[2]。また、直流給配電システムには、双方方向の電力変換が可能な多種多様な電力変換装置が複数台用いられることが予想されるため、これらをいかに制御してシステム運用を行うかといった検討なども報告されており、極めて興味深い。

しかしながら、直流給配電システムを構成する個別要素としての電力変換回路についてみれば、AC/DC、DC/DC、DC/AC といった電力変換技術の開発は、既に十分に進歩しているとの見方もある。個別の電力変換回路の高効率化、並びに小型軽量化、低コスト化については、さらなる進展が望ましいことには変わらないが、簡便に直流給配電システムを構成する上では、ある程度追及されたといえよう。しかし、直流給配電システムに特化した電力変換器のあり方については、筆者の知る限り検討例が見当たらないようである。

筆者らは、分散電源や蓄電装置の直流出力をそのまま負荷で利用することのできる方式として、需要家における直流給配電システムについて検討を行っている。とりわけ、複数の直流電圧レベルのキャパシタ端子を有するフライングキャパシタ形マルチレベルインバータ^[3]を応用して、直流給配電システムに特化した電力変換回路を提案している。

* 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部
〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1
Institute of Technology and Science, The University of Tokushima.
2-1 Minamijosanjima, Tokushima, 770-8506

これにより、変換器台数の極小化による高効率化を目標としている。本稿では、この変換回路の基本動作について、シミュレーション解析により動作検証を行った結果について述べる。

2. 直流給配電システムにおける技術課題の検討

図 1 (a) に示すのは、直流給配電システムについての従来からの主要な構成方法の概念図である。システム内に直流母線(DC Bus)を持ち、これと既存の交流電力系統、直流型分散電源や蓄電池、直流負荷、交流負荷の各種機器が、多種多様な電力変換回路によって相互結合され構成されている。ただし、この従来方式であれば、直流を出力する電源と直流を直接利用可能な負荷が複数の変換器を経由して連系されている構成となっている。まえばきでも述べたように、個別の電力変換器の変換効率が上限に近づいているとすれば、さらなる高効率化を目指すためには、システム全体を視野に入れて電力変換構造を見直すことによって変換器の集約化を図ることが一つの方法として考えられる。こうして、電源から負荷にいたる変換台数の削減を行うことにより、システム全体で見た効率向上が実現すると期待される。

(a) これまでの直流給配電システムの概念

(b) 提案する直流給配電システム

図 1 直流給配電システムの構成
Fig. 1. Configurations of (a) conventional and (b) proposed dc power network.

2. フライングキャパシタ形マルチレベルインバータ

図 2 にフライングキャパシタ形マルチレベルインバータの基本構成を示す。図中のキャパシタは、それぞれ直流で充電されており、キャパシタ C_H のみ高電圧に充電され、各相にこれより低い電圧で充電された低圧キャパシタ C_{LU} ,

図 2 フライングキャパシタ形マルチレベルインバータの基本構成

Fig. 2. A basic configuration of flying capacitor multilevel inverter.

C_{LV} , C_{LW} を有する。図に示すとおり、この回路は複数の直流キャパシタを持つことが特徴の一つである。高圧キャパシタ C_H の電圧を E_{Ch} とし、各相の低圧キャパシタ電圧をそれぞれ E_{Clu} , E_{Clv} , E_{Clw} と表すとき、従来の同インバータでは $E_{Clu} = E_{Clv} = E_{Clw} = (1/2) E_{Ch}$ のように充電し、交流フィルタを使用せずに交流側出力電圧の歪み低減を実現することが主な目的であった。また、マルチレベルインバータのなかでも、この方式は中性点を持たず、スイッチングパターンの選択によってそれぞれのキャパシタの充放電を行う自由度が高いことが特徴の一つとされてきた。このため、例えば無効電力補償装置へ応用した場合、キャパシタ容量の低減が期待できることがわかっている^[4]。

以下では、フライングキャパシタ形マルチレベルインバータが持つ複数の直流電圧レベルのキャパシタ端子を直流母線とみなすことで、直流給配電システム用途に特化した電力変換回路の提案を行い、その基本動作についてシミュレーションにより検討を行う。

3. フライングキャパシタ形マルチレベルインバータによる電力変換回路のパワーフロー

図 3 に、図 2 のフライングキャパシタ形マルチレベルインバータによる電力変換回路の 1 レグを示す。DC₁ が高電圧、DC₂ が低電圧に充電されているとする。この複数の端子を直流給配電システム用の端子として用いようとするのが本研究の特徴である。

簡単のために DC₁, DC₂ 及び AC にはそれぞれエネルギー源があるものとし、この 1 レグにおけるパワーフローの考察を行う。DC₂ にキャパシタを設置したとして、このキャパシタの充放電モードと電流経路の関係について示したのが図 4 である。図 4 (a) のモード 1 では、S₁, S₂ がオン、S₃, S₄ がオフである。このため、DC₁ と AC の間で電力授受が行われ、このとき DC₂ は開放されている。従って、AC 側には DC₁ の電圧 E_{d1} が現れる。一方、図 4 (b) のモード 2 では、S₁, S₃ がオン、S₂, S₄ がオフである。このときの電流経路は図の矢印の通りであって、DC₁ と AC の間で電力授受が行わ

図3 フライングキャパシタ形の1レグ
Fig. 3. One leg of flying capacitor multilevel inverter.

図4 1レグのスイッチングモード
Fig. 4. Switching modes per one leg.

れる一方で、 DC_1 と DC_2 の間でも同時に電力授受が行われる。なお、このときのAC側の端子には、 DC_1 の電圧 E_{d1} と DC_2 の電圧 E_{d2} の差($E_{d1} - E_{d2}$)が現れる。次に、図4(c)のモード3では、 S_2, S_4 がオン、 S_1, S_3 がオフである。このときは、 DC_2 とACの間で電力授受が行われ、 DC_1 は開放される。従って、AC側には DC_2 の電圧 E_{d2} が現れる。最後に、図4(d)のモード3では、 S_3, S_4 がオン、 S_1, S_2 がオフである。このときは、いずれの端子間でも電力授受は行われず、AC側にはゼロ電圧が現れる。表1に動作モードとそのときのAC端子側への出力電圧をまとめて示す。

ここでは1レグのみ考えているため、AC側とはいっても、ここに純粋な交流が出力されるわけではない。例えばこれを2レグ構成すれば単相交流電源が取り出せるし、3レグで構成すれば三相交流系統との連系も可能になる。

端子 DC_2 にキャパシタを置き、これを DC_1 の電圧の1/2、すなわち $E_{d1}/2$ で充電を行うとき、(b)モード2と(c)モード3は、出力電圧が同じで DC_2 のキャパシタを流れる電流の向きだけが異なるモードになる。この出力電圧のときに、モ

表1 動作モードと出力電圧

Table 1. Switching modes and their output voltages.

状態	S_1	S_2	S_3	S_4	出力
Mode 1	ON	ON	OFF	OFF	E_{d1}
Mode 2	ON	OFF	ON	OFF	$E_{d1} - E_{d2}$
Mode 3	OFF	ON	OFF	ON	E_{d2}
Mode 4	OFF	OFF	ON	ON	0

ード選択の自由度を利用してキャパシタの充放電を行い、結果的にキャパシタ容量の削減を目指したのが文献[4]であった。 DC_2 を $E_{d1}/2$ で充電するとき、出力側には3レベルが出力される。

また、この回路はさらにマルチレベル化を行うことも可能である。適正なレベル数と構成は、直流給配電システムの構成問題にも関わるため、システム全体の構成と併せて検討を行う必要がある。

4. 計算機シミュレーションによる直流給配電システムモデル例の検討

図5の簡易モデルを用いて、提案方式の直流給配電システムのシミュレーション解析を行い、基本動作特性の検証を行う。シミュレーション定数は表2に示すとおりである。図5で、三相交流電圧源は、既存の交流電力系統との連系点電圧を模擬している。簡単のために、無限大母線とみなせるとして理想電圧源で表している。 RL_2 は交流で使用される負荷として遅れ力率の低インピーダンス負荷を置いて考えることとする。実システムでは、交流を必要とする機器として交流電動機等の回転機が考えられる。交流電動機に

図5 シミュレーション解析に用いた提案方式の直流給配電システムの簡易モデル

Fig. 5. A simplified dc power supply system for simulation studies.

表2 シミュレーション定数

Table 2. Constants for simulation studies.

系統側定数: $V_s = 200V_{rms}$, 60Hz, $RL_1 = (10m\Omega, 1mH)$, $RL_2 = (6\Omega, 6mH)$
電圧基準値: $E_d^* = 300V$, $V_{C1}^* = 200V$, $V_{C2}^* = 150V$, $V_{Cw}^* = 100V$
負荷抵抗: $R_d = 30\Omega$, $R_w = 20\Omega$, $R_s = 15\Omega$, $R_w = 10\Omega$
インバータ: $C_d = 40mF$, $C_v = C_w = C_{w'} = 15mF$, $C_f = 50\mu F$
$K_v = 0.67$, $K_w = 0.5$, $K_{w'} = 0.33$

においては、過渡特性への配慮等が必要となるが、それらは今後の課題とする。 R_{L1} は直流端子台に相当するフライングキャパシタ形マルチレベルインバータまでの引込み線に相当するラインのインピーダンスとし、 C_f はフィルタとしてのキャパシタンスである。フライングキャパシタ形インバータの高圧直流側については、十分に充電され、また何らかのエネルギー源あるいは別系統からの充電がなされているものと理想的条件を仮定し、ここでは直流電圧源を置いて考えるものとする。一方、低圧直流側には複数の異なった種類の負荷がかけられるものとする。ただし、汎用性を考えて、キャパシタ C_u , C_v , C_w は全て同じ容量のものを回路側で設置するものとする。これにそれぞれ異なる定抵抗負荷を持たせている。

図 6 にシミュレーション結果を示す。図 6 (a) はマルチレベルインバータ部へ流れ込む向きの三相交流電流の波形である。交流側から見れば、出力側が電圧源の三相整流回路とみなせるため、基本的に電圧形整流回路の入力電流と同様の波形となる。ただし、各レグに繋がれる負荷が等しい場合には交流側には三相平衡電流が期待されるが、ここでは 3 レグそれぞれ負荷が異なるため、交流側電流には不平衡電流となって表れることになることが図 6 (a) から確かめることができる。

図 6 (b) は、各直流端子の電圧である。いずれの端子も所望の基準値どおりの安定した直流電圧を実現することができている。図 6 (c) ～ (e) は各相の相電圧波形を示している。いずれの相も、マルチレベル化により歪の小さい電圧波形が実現されている。

5. まとめ

直流給配電システムのための電力変換回路として、フライングキャパシタ形マルチレベルインバータによる AC/DC/DC 変換回路を提案した。従来、高圧直流電圧の 1/2 に充電することとされてきた低圧直流電圧を、複数の直流端子とみなし、かつ異レベルの充電を行うことで直流給配電システムを構成することとした。この回路方式について、簡単な直流給配電システムを構成し、シミュレーションによる動作検証を行ったところ、交流側は不平衡電流となるが、直流端子のそれぞれには所望の直流電圧を実現することができた。不平衡電流を、交流系統とそれに繋がる回転機など不平衡現象の影響を受ける機器に悪影響を及ぼさない範囲での運用とするなら、直流電源から直流負荷までの変換段数の削減に繋がることが期待されるため、高効率化が果たされるものと考えられる。

なお、ここでは交流側に頑健な電力系統が存在する仮定の下で検討を行ったが、直流側に十分な容量の電源が存在する場合には直流側から交流側への電力供給も可能である。その場合、出力側は三相に限らず単相交流電源として働かせることもできる。このような構造は、発展途上国や僻地での独立電源用変換器としての応用可能性を持つ。その場合にも、変換器の主回路、制御システムとも集中的に

図 6 シミュレーションによるフライングキャパシタ形マルチレベルインバータ部の動作波形
Fig. 6. Operating waveforms of the flying capacitor multilevel inverter by simulation studies.

配置されることになるため、高度な技術を必要とせず交換によるメンテナンスで対応可能であるなどの特長も備えている。

今後は、具体的な分散電源や蓄電装置、負荷装置といったシステムを特徴付ける構成要素を考慮し、その特性も含めて解析を行うことも課題の一つである。その一方で、簡単なモデルを対象にしてハードウェアモデルを構築することも必要であろう。また、変換器台数を削減する一方で、個別の変換器で構成する方式に比べてシステム制御の自由度が下がることも考えられる。こうした問題点についても明らかにすべく検討を進めていく予定である。

(2008年5月31日発表)

文 献

- [1] 電気学会技術報告 第1031号「直流配電網のフィージビリティ」、2005年。
- [2] D. Deaconu, A. Chirila, M. Albu and L. Toma: “Studies on a LV DC network,” Proc. of EPE 2007, No.0692, 2007.
- [3] T. A. Meynard and H. Foch, “Multi-level conversion: high voltage choppers and voltage-source inverters,” in Proc. IEEE Power Electronics Specialist Conf., 1992, pp. 397-403.
- [4] M. Hojo, T. Ohnishi: “SVG Using Three-Level PWM Inverter Constructed by Series Capacitors,” Proc. of IPEC- Tokyo 2000, Vol. 4, pp.2151-2156, 2000.

【質 疑】

日新電機（株）・栗尾信広氏

【質問1】 直流キャパシタ C_d , C_u , C_v , C_w の容量が大きめのようだが、どのように決めたのか。

【回答1】 本構成の直流電圧の安定性は、直流キャパシタの容量と、これに並列に接続される直流負荷の容量に大きく影響される。基礎検討の現段階では、大きめの容量を設定して検討を行ったが、今後は電圧変動の許容範囲と負荷容量、スイッチング周波数の制約等を含めて総合的な検討を行っていく予定である。

【質問2】 初期充電において各レグに重負荷があると充電動作が難しくなると思うが、対応についてはどうか。

【回答2】 フライイングキャパシタ形マルチレベルインバータを応用した STATCOM における初期充電方法については文献 [4] でも検討を行ってきたが、本構成にとっては、初期充電に限らず、運転中においても重負荷への配慮は最も重要になると考えられる。なるべくいずれかのレグに負荷が偏らないよう、システム設計時の配慮が必要と考えられるが、今後はご指摘の観点からもシステムの仕様を明らかにしていきたい。

【質問3】 各レグの負荷は必ずしも一定とは限らず、停止時には電流がゼロになって交流側にも影響を及ぼすと考えられるがどうか。

【回答3】 直流の高電圧側にエネルギー源を想定しているこのケースでは、直流側の無負荷時にはモード1とモード4の2モード運転での使用で対応が可能と考えられるが、負荷変動応答や無負荷時の振る舞いについては早急な検討が必要であると考えている。

【質問4】 各レグ出力がコモンモード的にフロートしているが、電磁ノイズや人体への安全についてはどうか。

【回答4】 安全性を確保するための保護技術については電力変換回路において重要な課題と認識しており、対策が必要であると考えている。直流の遮断技術と共に、直流を扱っている様々なシステム技術についての技術調査を行い、本システムの可能性について検討を進める予定である。

大阪工業大学・木村紀之氏

【質問1】 個別変換に対して集中変換にする場合、どの程度の規模（以上／以下）で高効率になると考えられるか。

【回答1】 本構成では、変換段数の極少化により半導体バルブデバイスにおける導通損失の低減を図ることでシステム全体の高効率化を目指している。従って、変換過程の損失については、規模によらず高効率化が達成されと考えている。しかし、大規模システムで用いる場合には、低電圧・大電流を扱う直流線路が延びることも予想され、線路損失の増大が無視できなくなる。今後は損失の定量的評価も行っていきたい。

【質問2】 フライイングキャパシタ部の出力電圧を全て同一にした場合は、負荷容量に関わらず、交流側の電流歪みを低減できるか。

【回答2】 負荷容量の偏りによって、交流側の電流不平衡にも配慮する必要がある。電流歪みについては、スイッチングパターンの選び方にも大きく左右されと考えられるので、交流側で要求される歪み率の上限値や不平衡の限度も考慮しながら、具体的なシステム構成を検討していく予定である。

(株) ジーエス・ユアサ パワーサプライ・山口雅英氏

【質問1】 直流給配電ネットワークに対して各コンバータの動作はどのように行うのか。バスの制御は通信線等に

よって行うのか。

【回答1】 多数台コンバータを並列運用する直流給配電システムにおいて、その協調制御が極めて簡単な構成になれば、現状技術においては制御の自由度の小さい本構成のメリットは小さくなる。直流給配電ネットワークに関する興味深い先行研究も多数報告されているため、それらの動向を注視しながら検討を進めていきたいと考えている。

(株) ジーエス・ユアサ パワーサプライ・遠藤浩輝氏

【質問1】 マルチレベルインバータを用いた DC 負荷への給電には不平衡電流が伴うため、負荷が限定されるのではないか。想定している直流負荷と、システム設計の自由度が下がることに対してはどのように考えているか。

【回答1】 DC 負荷のレグ間の偏りは不平衡電流の原因となるため、交流側の電力品質を考えると負荷が限定される。常時運用される負荷や、照明等の同時に使用される負荷をレグ間に均等に配置するなど、システム設計の段階である程度負荷の均衡を図る必要がある。負荷変動を考えると如何なる直流給配電システムに対しても適した方式であるとはいえないが、ある程度固定した使用方法の給配電システムにおいてはメリットもあるものと考えている。今後、現行の直流給配電システムや、諸外国で行われている直流給配電技術の導入研究についての技術調査を行い、本方式に適した具体的な構成を提案していく計画である。