

# 複数の風力発電機を接続したモジュラーマルチレベルコンバータを用いた 単相系統連系に関する基礎検討

## Fundamental Verification for a Single-Phase Grid-Tied Modular Multilevel Cascade PWM Converter With Multiple Wind Power Generators

石橋 広成<sup>†</sup> 山田 洋明<sup>††</sup>

Kousei Ishibashi<sup>†</sup> Hiroaki Yamada<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 山口大学 工学部 <sup>††</sup> 山口大学 大学院創成科学研究科

### 1 はじめに

我が国では現状、ほとんどのエネルギー源を海外からの輸入に依存し、2017年のエネルギー自給率は9.6%である。海外においてエネルギー供給上何らかの問題が生じた場合、我が国が自律的に資源を確保することが難しいという根本的な脆弱性を有している [1]。

近年、省エネや二酸化炭素排出の削減など、環境的に負荷が少ない技術が求められており、電力・産業技術分野では小型で高効率な高圧インバータの需要が高まっている。そのなかでも特に、「トランスレス」方式のマルチレベル電力変換器に対する注目度は高い [2]。

図1に、従来の系統連系システム [3] を用いた複数の風力発電機の連系を示す。小型風力発電機を用いた風力発電システムは発電電圧が低く、高圧系統へ直接接続するためには、個別にトランスを設置する必要がある。複数台の風力発電機を用いた場合、システムの体積容量が増大する課題がある。一方で、モジュラーマルチレベル変換器は、セルを多段構成することで高電圧の系統への連系が可能となる [4]。

本稿では、モジュラーマルチレベルコンバータ(MMC:Modular Multilevel Converter)を用いた複数の小型風力発電機の単相系統への連系についての基礎検討を行う。各セルキャパシタに風力発電システムを接続し、個別に発電を行う。この発電電力を各ブリッジセルを介して系統へ逆潮流する。これにより、フィルタレス、あるいは、小容量のフィルタで高圧系統への連系が可能となる。本稿では、基本原理確認を目的として、風力発電システムを電流源で模擬し、異なる発電状態における系統への逆潮流を PLECS を用いた計算機シミュレーションにより確認する。

### 2 システム構成

#### 2.1 回路構成

図2に、本論文で提案する複数の風力発電機を接続したモジュラーマルチレベルコンバータを用いた単相系統連系システムを示す。風力発電機によって発電された交流電力を整流器によって AC/DC 変換する。周速比制御を適用した昇圧チョッパ回路を用いて DC/DC 変換を行い、単相モジュラーマルチレベルコンバータによって DC/AC 変換して系統に連系させている。接続す

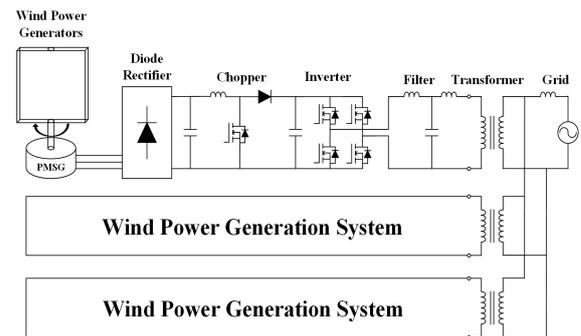


図1: 従来の系統連系システム [3] を用いた複数の風力発電機の連系

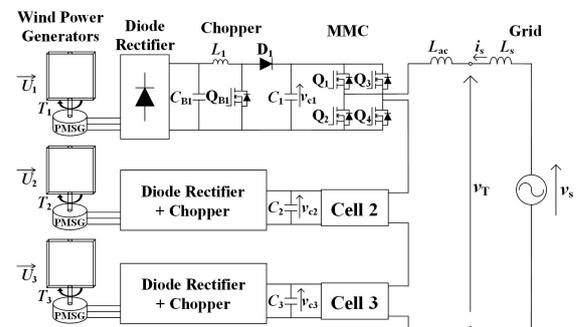


図2: 本論文で提案する複数の風力発電機を接続したモジュラーマルチレベルコンバータを用いた単相系統連系システム

る小型風力発電機は各セルごとに設置している。小容量の発電システムを想定しているため、系統電圧は単相としている。本論文では原理確認を目的として、ブリッジセルのカスケード数  $N$  は3とする。モジュラーマルチレベルコンバータと受電端の間に連系インダクタ  $L_{ac} = 9.0\%$  を接続している。

#### 2.2 制御システム

図3に、提案する MMC を用いた風力発電システムの制御ブロックを示す。本制御システムは直流電圧一括制御とブリッジセル電力制御、段間直流電圧 balan

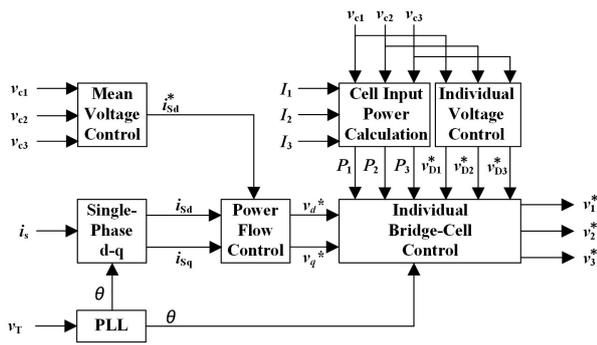


図 3: 提案する MMC を用いた風力発電システムの制御ブロック

ス制御 [5], [6], [7] で構成される。本制御システムにおいて、単相 d-q 変換および、段間直流電圧バランス制御で用いる電気角は、系統電圧  $v_T$  を単相 PLL(Phase-Locked Loop) 回路に入力することによって得られる。

直流電圧一括制御 (Mean Voltage Control) では、各ブリッジセルの直流キャパシタの平均値を制御し、指令値と平均値との偏差を PI 補償器により増幅し、これを電源電流の有効電流指令値とする。有効電力制御によってコンバータ全体へ流入する電力を制御する。各セルで共通の電圧指令値を決定し、MMC のスイッチ動作を制御する。また、個別ブリッジセル制御では、各セルで逆潮流する有効電力の大きさと各セルの直流キャパシタ電圧を個別に制御し、各ブリッジセルの電力を制御する。

以上の制御により、各ブリッジセルの電圧指令値を生成し、キャリア位相シフト PWM により、各ブリッジセルのスイッチング信号を生成する。

### 3 シミュレーション結果

本論文で提案する複数の風力発電機を接続したモジュラーマルチレベルコンバータを用いた風力発電システムの有効性を確認するために、PLECS を用いた計算機シミュレーションを行った。図 4 に、風力発電機を電流源で模擬した提案する MMC を用いた風力発電システムを示す。各風力発電機は、簡単のために電流源で模擬してシミュレーションを行う。

#### 3.1 各セルの発電量が等しい場合

表 1 に、各セルの発電量が等しい場合の図 4 の回路定数を示す。垂直軸型の 1 kW 風車 ( $r = 1\text{ m}$ ,  $A = 4\text{ m}^2$ ) を想定し、各電流源は、発電電力がすべて 1 kW であるとして直流電流源の値を決定した。また、無効電流指令値は 0 A とし、力率 1.0 で逆潮流するように制御を行う。

図 5 に、各セルの発電量が等しい場合のシミュレーション結果を示す。図 5 は上から、系統電圧、系統電流、各セル合計の平均電圧、各セル ( $N=1,2,3$ ) のキャパシタ電圧を示している。シミュレーション結果より系

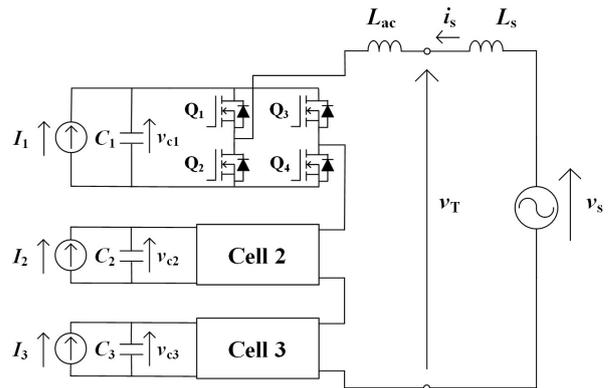


図 4: 風力発電機を電流源で模擬した提案する MMC を用いた風力発電システム

表 1: 各セルの発電量が等しい場合の図 4 の回路定数

Item	Symbol	Value
DC current	$I_1 = I_2 = I_3$	3.33 A
DC reference voltage	$v_{Dn}^*$	300 V
AC source voltage	$v_s$	210 Vrms
Frequency	$f$	60 Hz
AC inductor	$L_{ac}$	3.6 mH(10%)
Inductor	$L_s$	155 $\mu$ H(0.2%)
DC capacitor	$C_n$	5 mF
Unit capacitance constant	$H$	0.2 s( $p=1$ kW)
Cascade number	$N$	3
PWM carrier frequency	$f_{tri}$	4 kHz
Equivalent carrier frequency		24 kHz

統電圧と系統電流は逆位相となっており、力率 1.0 で逆潮流できている。また、各セルのキャパシタ電圧の平均値は目標値である 300 V で一定となっていた。系統電流  $i_s$  の総合ひずみ率 (THD: Total Harmonic Distortion) は、0.55% であった。

#### 3.2 各セルの発電量が異なる場合

表 2 に、各セルの発電量が異なる場合の図 4 の回路定数を示す。各電流源は、発電電力が 0 W, 500 W, 1 kW であるとして直流電流源の値を決定した。また、無効電流指令値は 0 A とし、3.1 節と同様に力率 1.0 で逆潮流するように制御を行う。

図 6 に、各セルの発電量が異なる場合のシミュレーション結果を示す。図 6 は上から、系統電圧、系統電流、各セル合計の平均電圧、各セルのキャパシタ電圧を示している。各セルの発電量が異なる場合においても、各セルのキャパシタ電圧の平均値は目標値である 300 V で一定となっていた。系統電流  $i_s$  の総合ひずみ率は 1.22% であった。

以上の結果から、発電状態の異なる風力発電システムにおいても各ブリッジセルの直流キャパシタ電圧を

表 2: 各セルの発電量が異なる場合の図 4 の回路定数

Item	Symbol	Value
DC current	$I_1, I_2, I_3$	0A, 1.67A, 3.33 A
DC reference voltage	$v_{Dn}^*$	300 V
AC source voltage	$v_s$	210 Vrms
Frequency	$f$	60 Hz
AC inductor	$L_{ac}$	3.6 mH(10%)
Inductor	$L_s$	155 $\mu$ H(0.2%)
DC capacitor	$C_n$	5 mF
Unit capacitance constant	$H$	0.2 s( $p=1$ kW)
Cascade number	$N$	3
PWM carrier frequency	$f_{tri}$	4 kHz
Equivalent carrier frequency		24 kHz

一定に維持しながら，系統連系できることを明らかにした。

#### 4 まとめ

本稿では，モジュラーマルチレベルコンバータを用いた単相系統連系について基礎的な検討を行った。各セルで発生する電力が異なった場合においても発電電力を逆潮流しながら，キャパシタ電圧の平均値はすべてのセルで一定に維持できることを確認した。今後は，モジュラーマルチレベルコンバータに接続する風力発電機や整流回路，チョップ回路を用いて風速の連続的な変動について検討を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] 経済産業省 資源エネルギー庁：「第 5 次エネルギー基本計画」(平成 30 年 7 月)
- [2] 長谷川 勇, 濱田 鎮教, 小堀 賢司, 庄司 豊：「トランスレスマルチレベル高圧インバータの開発」, 明電時報 通巻 352 号 2016 No.3(2016)
- [3] 成定 佑樹, 山田 洋明, 田中 俊彦, 田村 智弘, 山田 誠治, 岡本 昌幸：「パワーコンディショナを用いた小容量風力発電システムにおける可変周速比制御」, 平成 28 年度電気学会産業応用部門大会, Y-36(2016)
- [4] H. Akagi: "Classification, Terminology, and Application of the Modular Multilevel Cascade Converter (MMCC)," IEEE Trans. PEELS, Vol.26, No.11, pp.3119-3129, 2011
- [5] L.Maharjan,T.Yamagishi,H.Akagi: "Active-Power Control of Individual Converter Cells for a Battery Energy Storage System Based on a Multilevel Cascade PWM Converter",IEEE Trans. Power Electron.,Vol.27,NO.3,pp.1099-1107(2012)

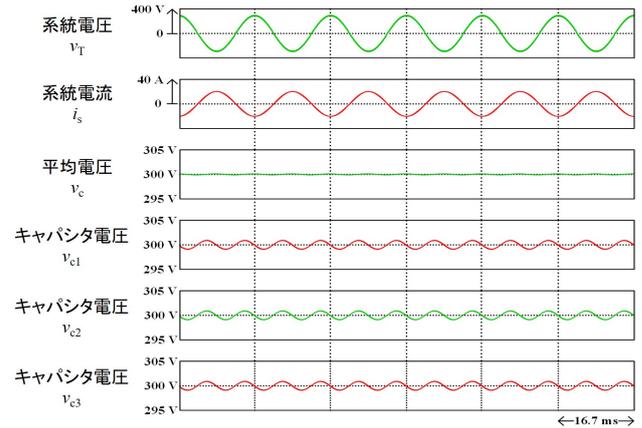


図 5: 各セルの発電量が等しい場合のシミュレーション結果

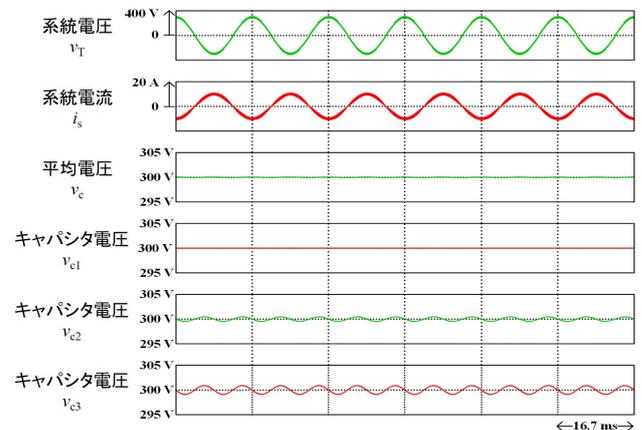


図 6: 各セルの発電量が異なる場合のシミュレーション結果

- [6] 山岸 司, マハルジャン・ラクスマン, 赤木 泰文：「モジュラー・マルチレベル・カスケード変換器を用いた電池電力貯蔵装置の電池電力個別制御」, 電学論 D, 131 巻 1 号, pp.76-83(2011)
- [7] 吉井 剣, 井上 重徳, 赤木 泰文：「6.6kV トランスレス・カスケード PWM STATCOM -三相 200V 10kVA ミニモデルによる動作検証-」, 電学論 D, 127 巻 8 号, pp.781-788(2007)