

バッテリー充放電用 Dual Active Bridge コンバータを用いた 独立型風力発電システムによる電力損失の低減

Power Loss Reduction by Stand-Alone Wind Power Generation System with Dual Active Bridge Converter Based Battery Charger

高山 雄利[†] 山田 洋明[†]

Yuto Takayama[†] Hiroaki Yamada[†]

[†] 山口大学大学院創成科学研究科

1 はじめに

東日本大震災以降、原子力発電所の運転停止の影響を受け、日本における一次エネルギー国内供給構成の内訳は、化石燃料が2010年度81.2%に対し、2016年度では約88.9%に増加し、エネルギーの大半を海外からの輸入に依存している[1]。そのため、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーを活用した発電方法が注目されている。

中でも小容量風力発電は、主に風況の厳しい条件下での運転が想定されている。風車の入力エネルギーに対し、発電機二次側の要求エネルギーが上回った結果、風車の失速を招き発電効率の低下あるいは発電自体を停止してしまう可能性がある。これを防ぐため、風速と風車の回転速度の比である周速比を最適な値に維持することで、風車の機械出力を最大に保つ周速比制御がある[2]。周速比を制御することで、風車の機械出力を常に最大化し、負荷側で過度に電力を得ることによる失速を引き起こすことがなくなる。

著者らは、先に可変周速比制御を用いた独立型風力発電システム提案してきた。図1に、著者らが先に提案したシステム[3]を示す。可変周速比制御は、発電電力が大きいとき、ダンプロードが消費する余剰電力の値に応じて周速比指令値を減少させる。その結果、発電電力が抑制されるため、ダンプロードの小型化が可能となる。しかしながら、図1のシステムでは、発電機から交流負荷までに4段の電力変換が必要となるため、電力を効率よく利用できない。また、トランスで昇圧して交流負荷に100 Vrmsの電圧を印加するため、トランス前段のインバータでの電力損失が大きい。その結果、従来システムの発電機-交流負荷間の電力損失は、900 W発電時において67.3 Wとなっている。

上記の課題を解決するために、Dual Active Bridge (DAB) コンバータ[4]を用いた独立型風力発電システムを提案した[5]。このシステムでは、発電機-交流負荷間の電力変換段数を減らすことによって、従来のシステムより発電機-交流負荷間の電力損失を低減させる点に特長がある。また、このシステムではインバータが100 Vrmsを出力するためトランスが不要であり、インバータでの損失低減も図れる。DAB コンバータは絶縁型の双方向DC/DCコンバータであり、電力を双方

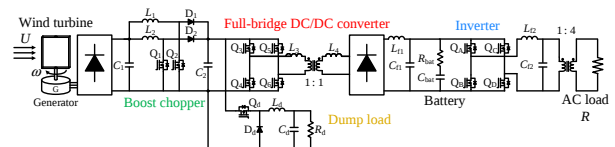


図1: 著者らが先に提案したシステム

向に融通可能な特長を利用しバッテリーの充放電コントローラとして用いる。発電電力が交流負荷の消費電力より大きいとき、DAB コンバータはバッテリー充電モード (Battery-charging mode ; BCM) となる。反対に発電電力が交流負荷の消費電力より小さいとき、DAB コンバータはバッテリー放電モード (Battery-discharging mode ; BDM) となる。文献[5]では、DAB コンバータを用いた独立型風力発電システムの原理確認を行った。本論文では、PLECS(Piece-wise Linear Electrical Circuit Simulation)を用いた計算機シミュレーションにより、文献[5]で提案したシステムの電力損失の低減効果を明らかにする。

2 提案する独立型風力発電システム

2.1 システム構成

図2に、DAB コンバータを用いた独立型風力発電システムを示す。昇圧チョッパは、前述した風車の周速比制御を行い、風車の機械出力を最大化する。インバータは、直流リンクの電圧を周波数60Hz実効値100Vrmsの交流電圧に変換し、交流負荷に印加する。DAB コンバータは、後述のバッテリー充放電制御に用いる。バッテリーは、内部抵抗 R_{bat} と静電容量 C_{bat} の直列回路で模擬する。ダンプロードは、発電機から余剰電力が生じた際に直流リンク部の過電圧保護のために使用する。

2.2 バッテリー放電モード時の直流リンク電圧制御

直流リンク電圧 v_{DC} が低下すると、直流リンクキャパシタ C_{DC} に並列に接続されるインバータの出力電圧が維持できない。それを防ぐため、 v_{DC} の電圧低下時はDAB コンバータはBDMとなる。DAB コンバータの二次側に接続されているバッテリーから一次側へ放電し、 v_{DC} の定電圧制御を行う。指令値は200 Vとする。発電電力の不足分をバッテリーからの放電で補うこ

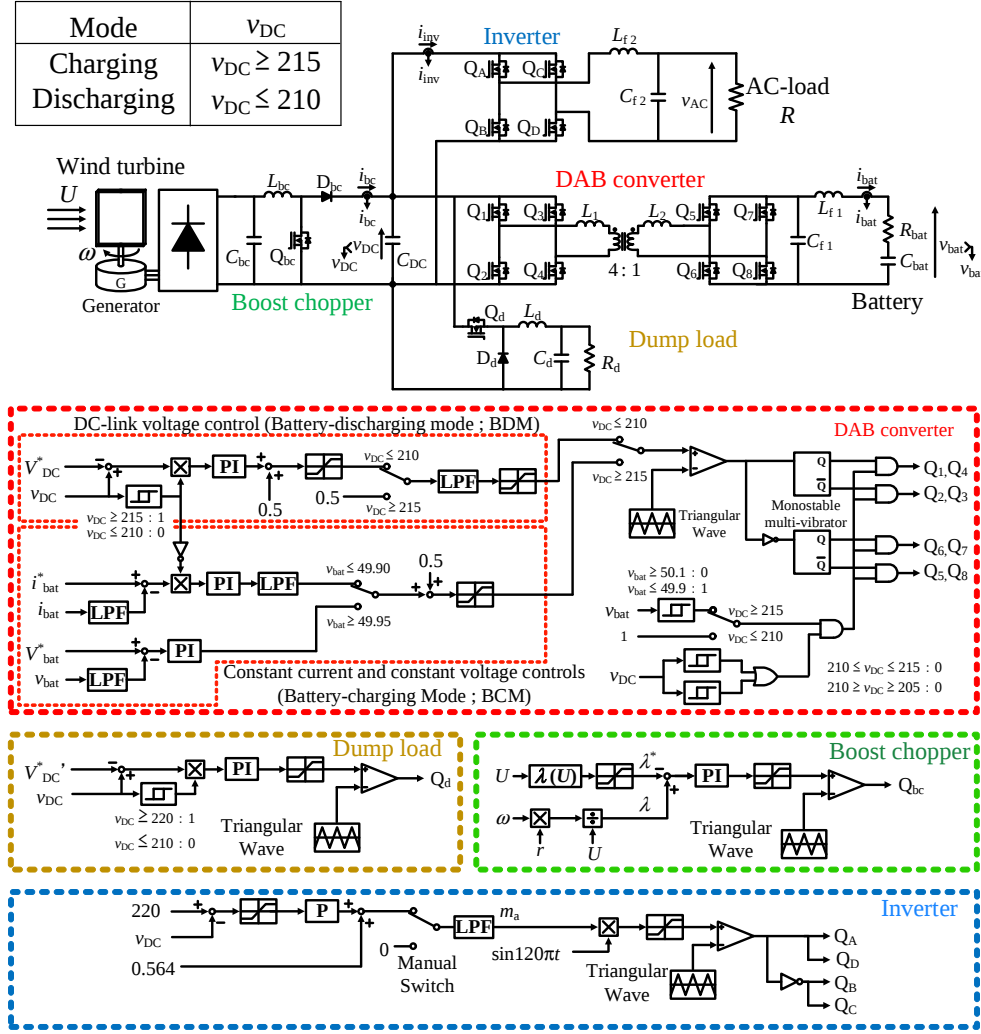


図 2: 本論文で提案する DAB コンバータを用いた独立型風力発電システム

とで, v_{DC} を一定にして交流負荷へ一定の電力を送る.

2.3 バッテリー充電モード時の定電流定電圧制御

DAB コンバータの BCM は定電流定電圧充電制御を用いる. 発電電力 p_g とインバータ側消費電力 p_{inv} の差分電力をバッテリー電力 p_{bat} として一次側から二次側へ融通する. バッテリー電流指令値 i_{bat}^* は下式のように演算する.

$$\begin{aligned} p_{bat} &= \eta(p_{bc} - p_{inv}) \\ i_{bat}^* &= \frac{\eta v_{DC}(i_{bc} - i_{inv})}{v_{bat}} \end{aligned} \quad (1)$$

ただし, i_{bat}^* は BCM 時のみ演算するため下限がゼロであり, バッテリー保護のため上限を 5 A とする. また, DAB コンバータの電力変換効率 η は状態により変化するが, 指令値の演算では簡単のため $\eta = 0.96$ で固定する.

バッテリー電圧指令値 V_{bat}^* は 50V とする. 充電動作開始時は定電流充電制御により, i_{bat} を i_{bat}^* に追従し

充電させる. バッテリー電圧 v_{bat} が上昇し, 満充電電圧 50V に充分近い 49.95V に達すると制御を定電圧充電制御に切り替え 50V 一定に制御する.

2.4 DAB コンバータのバッテリー充放電の切替制御

充放電の切替は v_{DC} によって行う. 初期モードを BDM とする. 発電電力が大きくなり v_{DC} が 215 V 以上まで上昇すると BDM から BCM に切り替え, 電力をバッテリーへ融通する. 発電電力が小さくなり v_{DC} が 210 V 以下まで低下すると, BCM から BDM に切り替え, v_{DC} を 200 V 一定に保つため電力の不足分をバッテリーから供給する. 210 V から 215 V の間はその前の制御モードを維持する. また, 制御切替の直前と直後は $i_{bat} = 0$ であるため, i_{bat} の向きは緩やかに変わる.

これらの充放電制御により, v_{DC} の変動を 200V~220V の間に抑制できる. この変動は, インバータの変調率可変制御によって出力電圧にはほぼ影響せず, 交流負荷へ一定の電力を供給可能となる.

3 シミュレーション結果

提案する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。表1に回路定数を示す。バッテリー容量 C_{bat} は、値が大きいほど充電に時間を要する。想定しているバッテリー容量は16387.8 Fだが、本論文ではシミュレーション時間短縮のため十分に小さい30 Fとしている。表1の条件で風速 U を7～13 m/sの間で変動させる。また、MOSFETはオン抵抗22 mΩ、ダイオードはオン抵抗58.8 mΩ、順電圧0.9 V、ダイオード整流器はオン抵抗5 mΩ、順電圧0.9 Vとする。

図3に、シミュレーション結果を示す。図3は上から、風速 U 、周速比 λ その指令値 λ^* 、発電電力 p_g 、バッテリー電圧 v_{bat} 、バッテリー電流 i_{bat} とその指令値 i_{bat}^* 、直流リンク電圧 v_{DC} とBDMの直流リンク電圧指令値 V_{DC}^* 、ダンプロードによる直流リンク電圧指令値 $V_{DC}^{*'}$ 、交流負荷電圧 v_{AC} を示す。図3より、BDM中は、バッテリー電流 i_{bat} がマイナス方向に流れて放電され、直流リンク電圧 v_{DC} が指令値 $V_{DC}^* = 200$ Vに追従していることが確認できる。また、BCM中は、バッテリー電流 i_{bat} が指令値 i_{bat}^* に追従して充電され、バッテリー電圧 v_{bat} が上昇していることが確認できる。このときの直流リンク電圧 v_{DC} はダンプロードによる直流リンク電圧指令値 $V_{DC}^{*'}$ 220 Vに追従している。交流負荷電圧 v_{AC} は99.6 Vrmsでほぼ一定となっている。

図4に、図2の各部の電力を示す。図4は、発電電力 p_g 、バッテリー電力 p_{bat} 、ダンプロード消費電力 p_d 、交流負荷の消費電力 p_{AC} である。約5秒までは、風車の加速に時間を要し、前述の周速比指令値に追従していないため機械出力が最大化されておらず、 p_g がほぼゼロとなっている。約5秒以降は、風速に応じた電力が発電されている。図4より、 p_g の変動に応じて上述の制御で p_{bat} を変化させることで、風速に依存せずに p_{AC} が496 Wで一定となっている。

また、発電機-交流負荷間の電力損失は、風速変動の激しさには依存しないが、発電量の大小によって変わる。900 W 発電時での発電機-交流負荷間の電力損失は29.3 Wとなっている。これは文献[3]の従来システムを同じ風速条件で900 W 発電したときの発電機-交流負荷間の電力損失67.3 Wに対し、56.5 % 低減されている。以上より、提案するシステムが電力損失の低減に有効であることを確認した。

4 まとめ

本論文では、バッテリー充放電用DABコンバータを用いた独立型風力発電システムについて述べた。文献[5]で提案した独立型風力発電システムは、文献[3]の従来システムの発電機-交流負荷間の電力変換段数やトランスを減らすことによって、電力損失を低減できる。風速変動を考慮したシミュレーション結果より、簡易な制御で風速に依存せずに交流負荷の消費電力を常に一定にできることが確認できた。また、発電機-交流負荷間の電力損失は、900 W 発電時で29.3 Wであり、こ

表 1: 図 2 の回路定数

Item	Symbol	Value
Internal resistance of battery	R_{bat}	24mΩ
Damp load resistor	R_d	62.5Ω
AC load resistor	R	20Ω
Boost chopper inductor	L_{bc}	60μH
DAB converter inductor 1	L_1	18.4μH
DAB converter inductor 2	L_2	18.4μH
Filter inductor 1	L_{f1}	12μH
Filter inductor 2	L_{f2}	1mH
Damp load inductor	L_d	0.5mH
Smoothing capacitor	C_{bc}	1880μF
DC-link capacitor	C_{DC}	4700μF
Capacitor for battery	C_{bat}	30F
Filter capacitor 1	C_{f1}	47μF
Filter capacitor 2	C_{f2}	10.4μF
Damp load capacitor	C_d	1μF
Switching frequency	f_{sw}	20kHz
Reference voltage in BDM	V_{DC}^*	200V
Reference voltage by dump load	$V_{DC}^{*'} $	220V
Reference voltage in fully charged state	V_{bat}^*	50V

れは従来のシステムの56.5 % 低減されている。以上より、提案するシステムが電力損失の低減に有効であることを確認した。

参考文献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁：「日本のエネルギー エネルギーの今を知る 20 の質問」
http://http://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/pdf/energy_in_japan2017.pdf(参照 2019.1.10)
- [2] E.Koutroulis and K.Kalaitzakis, “Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.53, no.2, April 2006
- [3] 谷口大騎, 成定佑樹, 山田洋明, 田中俊彦, 田村智弘, 山田誠治, 岡本昌幸：「小型風車を用いた独立型風力発電システムの可変周速比制御の検討」, パワーエレクトロニクス学会誌 Vol.43, pp.43-49, 2018
- [4] M. N. Kheraluwala, R. W. Gascoigne, D. M. Divan, E. D. Baumann, “Performance Characterization of a High-Power Dual Active Bridge dc-to-dc converter,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol.28, No.6, pp.1294-1301, 1992
- [5] Yuto Takayama and Hiroaki Yamada, “Dual Active Bridge Converter Based Battery Charger in Stand-Alone Wind Power Generation System With High-Inertia Wind Turbine,” in *Proc. of the 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2019)*, 1570545226, 5pages, Harbin, China, 2019

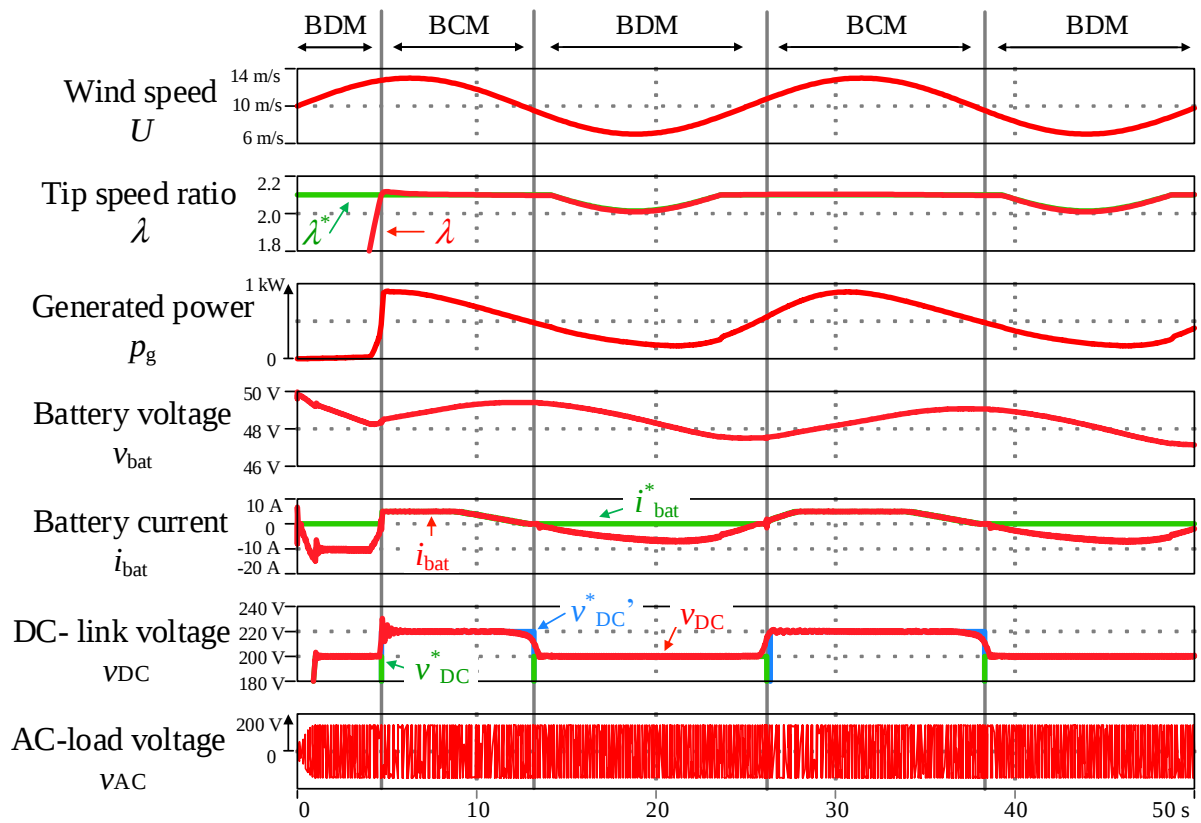


図 3: 図 2 のシミュレーション結果

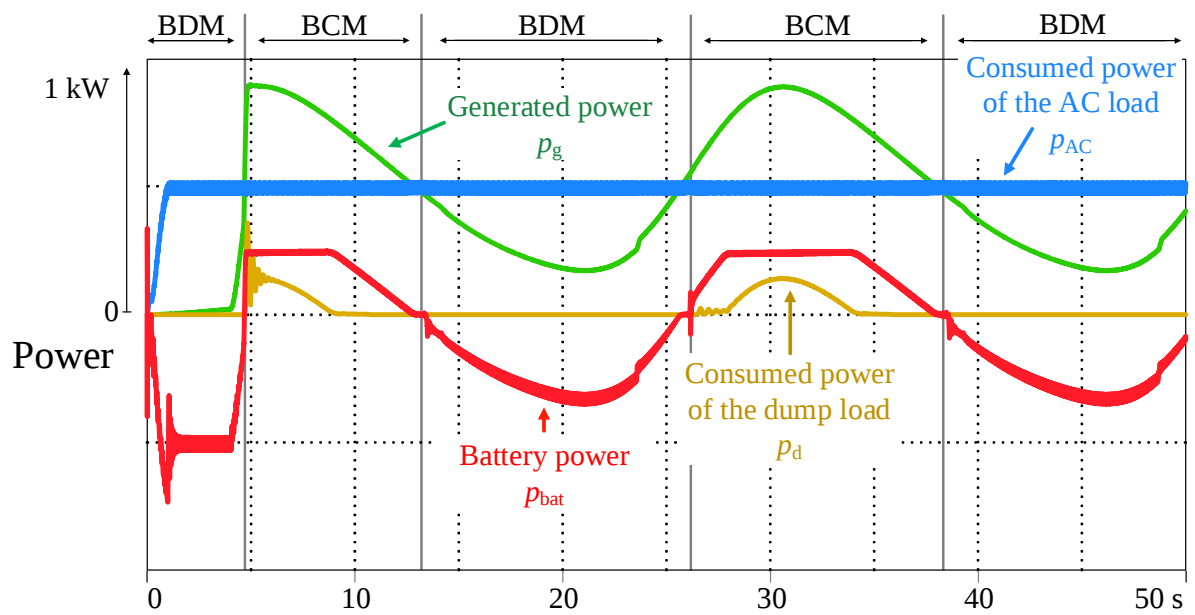


図 4: 図 2 の各部の電力