

巻線形誘導発電機を用いた風力発電システムの 系統電圧ひずみ下における電力脈動抑制

成田 暉*, 山本 吉朗, 池田 稔
(鹿児島大学大学院 理工学研究科)

1 はじめに

風力発電システムは系統末端に設置されることが多く、系統電圧のひずみにより出力電力の品質が悪化する場合があります。本稿では、巻線形誘導発電機を用いた風力発電システムにおいて、系統電圧に第 5 次、第 7 次高調波が発生した場合の電力脈動を抑制するために振幅と位相を調整した電流ひずみを注入する方式を提案し、実験およびシミュレーションでその効果を示したので報告する。

2 系統電圧高調波による電力脈動

系統電圧に第 5 次、第 7 次高調波成分が含まれる場合、電力には第 6 次高調波成分が生じる^[1]。このときの第 6 次電力脈動の式は、(1)、(2)式で表せる。

$$P_{s6} = P_{s\cos6} \cos(6\omega_e t) + P_{s\sin6} \sin(6\omega_e t) \quad (1)$$

$$Q_{s6} = Q_{s\cos6} \cos(6\omega_e t) + Q_{s\sin6} \sin(6\omega_e t) \quad (2)$$

(1)、(2)式において、 P_{s6} 、 Q_{s6} は固定子有効、無効電力の第 6 次高調波成分、下付き文字の \cos 、 \sin は、 \cos 成分の係数、 \sin 成分の係数を表す。また、

$$P_{s\cos6} = V_{sd+}^+ I_{sd5}^5 + V_{sd7}^+ I_{sd+}^7 + V_{sd+}^+ I_{sd7}^7 + V_{sd5}^5 I_{sd+}^+ \quad (3)$$

$$P_{s\sin6} = V_{sd+}^+ I_{sq5}^5 - V_{sq7}^+ I_{sd+}^7 - V_{sd+}^+ I_{sq7}^7 + V_{sq5}^5 I_{sd+}^+ \quad (4)$$

$$Q_{s\cos6} = -V_{sd+}^+ I_{sq5}^5 + V_{sq7}^+ I_{sd+}^7 - V_{sd+}^+ I_{sq7}^7 + V_{sq5}^5 I_{sd+}^+ \quad (5)$$

$$Q_{s\sin6} = V_{sd+}^+ I_{sd5}^5 + V_{sd7}^+ I_{sd+}^7 - V_{sd+}^+ I_{sd7}^7 - V_{sd5}^5 I_{sd+}^+ \quad (6)$$

ここで、上付き文字 $+$ 、5、7 は、それぞれ、基本波の dq 座標系、逆相 5 次に同期した dq 座標系、正相 7 次に同期した dq 座標系を表し、下付き文字 $+$ 、5、7 は、それぞれ、基本波成分、第 5 次成分、第 7 次成分を表す。

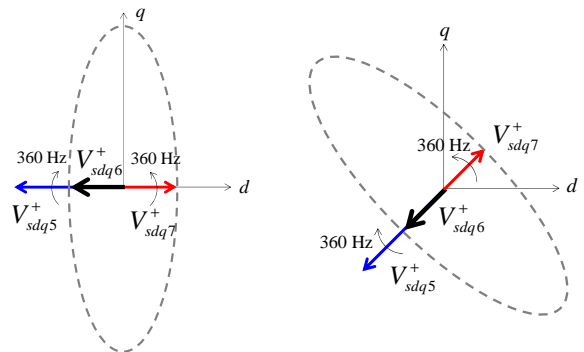
電力脈動を除去するために、 $P_{s\cos6} = P_{s\sin6} = 0$ 、 $Q_{s\cos6} = Q_{s\sin6} = 0$ として、固定子電流を求める。このとき、 dq 座標系において、第 5 次成分は逆相 6 次成分に、第 7 次成分

は正相 6 次成分に変換される。したがって、第 5 次成分と第 7 次成分の合成が dq 座標系における第 6 次成分になることを考慮すると、 I_{sd6}^+ 、 I_{sq6}^+ は、

$$I_{sd6}^+ = -V_{sd6}^+ I_{sd+}^+ / V_{sd+}^+ \quad (7)$$

$$I_{sq6}^+ = V_{sq6}^+ I_{sd+}^+ / V_{sd+}^+ \quad (8)$$

となる。これらの式が、電力脈動を抑制するために必要な固定子電流ひずみとなる。ここで、電圧の第 6 次成分について考えると、図 1 のように、系統電圧高調波の初期位相によって、 dq 座標系における 6 次成分の軌跡が異なる。したがって、高調波の位相が変化すれば、 d 軸、 q 軸に現れる 6 次成分の振幅および位相が変化する。従来法^[2]では、電力脈動を抑制するための電流高調波の位相を固定して注入していたため、系統電圧高調波の位相変動に対し、効果的に電力脈動の抑制ができていなかった。そこで、提案法では、(7)、(8)式において、固定子電圧の第 6 次成分の位相を用いることで系統高調波の位相変化に対応した電流高調波指令を生成する。



(a) 系統電圧の基本波と各高調波の初期位相が揃っている場合 (b) 系統電圧の基本波と各高調波の初期位相がずれている場合

図 1 dq 座標系における 6 次成分の軌跡

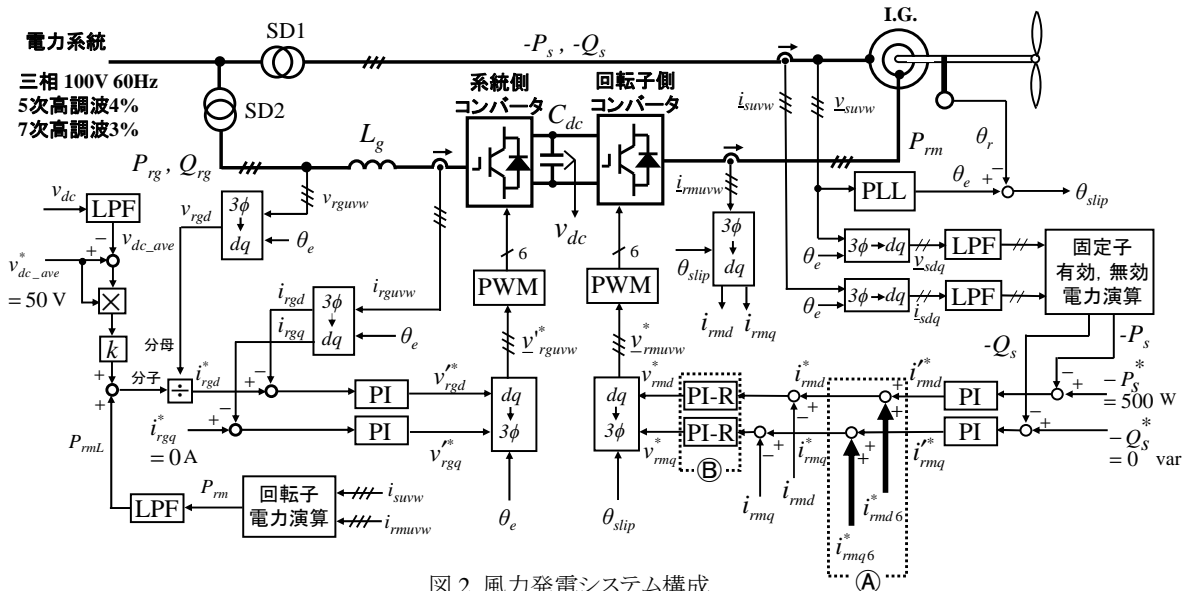


図 2 風力発電システム構成

3 システム構成

図2に風力発電システムの構成を示す。RSC制御では、①部分に電力脈動を抑制するための高調波電流指令を注入している。このとき、(7)、(8)式の固定子電流指令を誘導機の基本方程式を用いて回転子電流指令に変換している。また、交流成分の追従性を改善するために②部分にPI-Rブロックを用いている¹³⁾。GSC制御では、直流リンクの平均電圧を一定に保つ制御とGSC交流側を力率1にする制御を行っている。

4 シミュレーション結果および実験結果

表1にシミュレーションおよび実験で用いた巻線形誘導発電機の定格および定数を示す。風力発電システムにおいて、系統線間電圧を100V、系統電圧のTHDが5%となるように、第5次高調波を4%、第7次高調波を3%に設定し、各高調波の位相ずれは、図1の(a)の場合に対し、電力脈動が最も大きく変化するように第5次高調波を基本波に対し45°遅れ、第7次高調波を基本波に対し45°進みとした。固定子有効電力指令と固定子無効電力指令をそれぞれ、 $-P_s^* = 500\text{ W}$ 、 $-Q_s^* = 0\text{ var}$ 、系統側コンバータq軸電流指令を $i_{rgq}^* = 0\text{ A}$ とした。回転子速度は、1700rpm一定(次同期速度)に設定した。

電力脈動抑制制御なしの場合のシミュレーション結果を図3に、ありの場合のシミュレーション結果を図4に示す。脈動抑制なしの場合、電力に6倍の周波数の脈動が現れていることがわかる。一方、脈動抑制ありの場合は、固定子電流に適切な高調波を注入することで電力の脈動を抑制できている。確認のために、電力脈動抑制制御なしの場合の実験結果を図5に、ありの場合の実験結果を図6に示す。実験結果においても、電力脈動を抑制できたが、シミュレーションに比べ、無効電力への脈動抑制の効果が薄い。これについてはさらに検討が必要である。

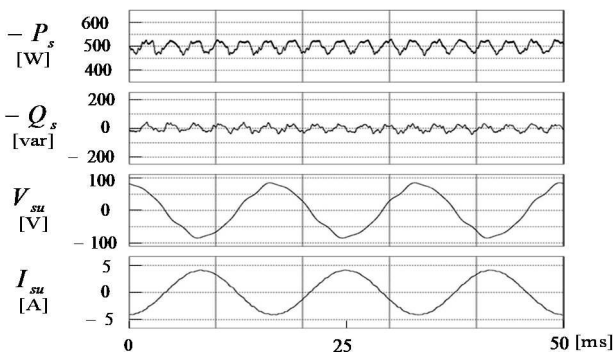


図3 電力脈動抑制制御なしの場合のシミュレーション波形

表2において、シミュレーション結果および実験結果の電力脈動および電流高調波を比較する。表2中の固定子電流の高調波成分は、基本波に対する割合を示す。表2より、電力脈動抑制制御を用いることで電力の脈動が抑制されることは明らかである。

5 まとめ

巻線形誘導発電機を用いた風力発電システムにおいて、系統電圧高調波の位相が変化する一般的な場合でも、提案の電力脈動抑制制御を用いることで、高調波による電力脈動の抑制が可能であることをシミュレーションと実験により明らかにした。

文献

- [1] Yipeng Song, Heng Nian, *IEEE Trans. Power Electron.* vol. 30, no. 9, pp. 4831–4842, Sep. 2015.
- [2] 成田, 山本, 池田, 平成28年度電気学会全国大会講演論文集, 4-070
- [3] J. Hu, Y. He, L. Xu, and B. W. Williams, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 2, pp. 439–459, Feb. 2009.

表1 巻線形誘導発電機の定格および定数

定格		定数	
出力	2.2 kW	固定子巻線抵抗 r_s	0.649 Ω
極数	4	回転子巻線抵抗 r_r'	1.20 Ω
固定子線間電圧	200 V	固定子漏れインダクタンス L_{ls}	0.106 mH
固定子電流	9 A	回転子漏れインダクタンス L_{lr}'	0.234 mH
回転子線間電圧	94 V	励磁インダクタンス L_m	0.104 H
回転子電流	18 A	巻数比 N_s/N_r	2.1

表2 電力脈動および電流高調波の比較

	シミュレーション結果		実験結果	
	脈動抑制なし	脈動抑制あり	脈動抑制なし	脈動抑制あり
有効電力の6次成分 P_{s6} [W]	25.3	8.12	12.0	2.94
無効電力の6次成分 Q_{s6} [var]	25.0	5.17	21.3	15.5
固定子電流の5次成分 I_{s5} [%]	0.41	2.4	4.1	3.4
固定子電流の7次成分 I_{s7} [%]	0.25	4.3	2.0	3.6

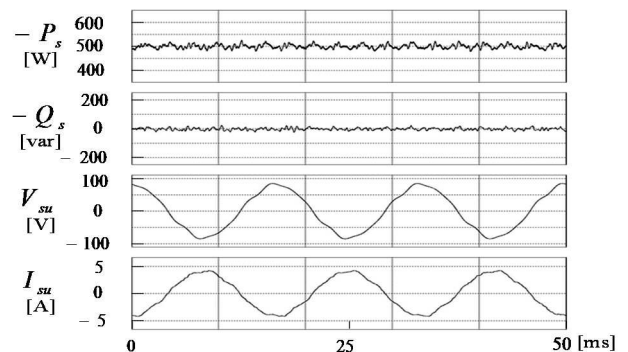


図4 電力脈動抑制制御ありの場合のシミュレーション波形

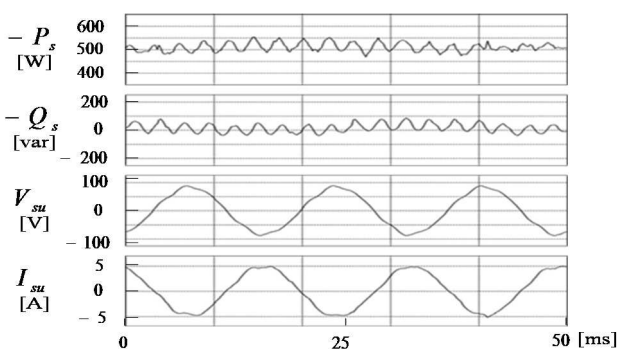


図5 電力脈動抑制制御なしの場合の実験波形



図6 電力脈動抑制制御ありの場合の実験波形