

DOI: 10.7667/PSPC152180

双馈风电机组电网背景谐波运行与谐波抑制策略研究

高骏, 王磊, 周文, 郭捷, 孟良

(国网河北省电力公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021)

摘要: 针对电网背景低次谐波引起的双馈风电机组定子电流畸变、功率及电磁转矩脉动, 建立了能够反映电网 5、7 次谐波电压下双馈发电机的特征谐波模型, 揭示了电网背景谐波电压对双馈发电机功率与电磁转矩脉动的影响机理。通过双馈发电机控制目标分析, 提出了基于比例-积分-谐振(PIR)调节转子电流内环的双馈发电机双闭环控制策略, 有效地消除了双馈风力发电机定子输出电流中的 5、7 次谐波和电磁转矩脉动。在 Matlab/Simulink 中建立了 1.5 MW 双馈风电机组仿真模型, 实现了风电机组谐波运行与抑制的全过程仿真。利用电网谐波发生模拟装置, 进行了双馈机组谐波运行与抑制现场试验, 仿真与现场试验证明了理论分析的正确性与谐波抑制策略的有效性。
关键词: 双馈发电机; 电网谐波; 转矩脉动; PIR 调节器; 谐波抑制

Study on operating behavior and suppression strategy of doubly-fed induction generators wind turbine under harmonic grid voltage conditions

GAO Jun, WANG Lei, ZHOU Wen, GUO Jie, MENG Liang

(State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: As the stator current will distort and electromagnetic torque of the doubly-fed induction generator wind turbine (DFIG-WT) will pulse due to low order grid harmonics voltage, the mathematical model of DFIG under the 5th and 7th order harmonics grid voltage is built, and the stator current and electromagnetic torque pulsation problems caused by the harmonics distortion is analyzed. The dual-loop closed control strategy based on rotor current PIR regulator is designed to suppress stator current harmonics and electromagnetic torque pulsation by the control target analysis. A 1.5 MW DFIG-WT is modeled in Matlab/Simulink, and the harmonic operating and suppressing process of DFIG-WT is simulated. And the field test is carried out on the 1.5MW DFIG-WT by grid harmonic generation equipment. The simulation and experimental results support the theoretical analysis and verify the proposed control strategy.

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG); grid harmonic; torque pulsation; PIR controller; harmonic suppression

0 引言

我国风电发展迅猛, 大规模风电接入给电网带来了一些负面影响。其中, 风电的谐波与谐振稳定性问题就受到了越来越多的关注, 风电机组/风电场因无法耐受电网谐波电压而导致的脱网事故时有发生, 特别是高电网背景谐波情况下的风电谐波放大与谐振问题。例如 2014 年 6 月, 新疆哈密某风电场出现了 5 次谐波谐振, 区域内大量风电机组跳闸停机。2015 年 1 月, 河北张家口某风电场因谐波问题长期无法正常运行, 经过检测发现风电运行 7 次谐波含量严重超标。类似由于电网背景问题所引起的水电机组无法正常运行的事件在我国多个地区均有发生, 严重阻碍了风电的安全稳定运行。

风电在实际运行中, 由于电网电压中含有一定的低次背景谐波分量, 以 5 次、7 次等低频谐波分量^[1-2]为主。在传统 PI 调节矢量控制作用下, 这些谐波分量会在系统的并网节点产生谐波电流, 与电网阻抗交互作用, 可能导致电网谐波放大, 甚至影响局部电网运行, 造成发电与用电设备损毁。双馈风电机组作为兆瓦级风电机组的主流风机之一, 其发电机定子直接与电网相连, 通过转子侧变流器控制双馈电机的转矩、转速和并网功率因数, 其谐波运行特性与抑制更加复杂。因此, 提高双馈风力发电机在电网电压低次背景谐波下的运行性能, 更好地抑制机组输出电流谐波非常重要^[3-4]。目前, 大量文献对双馈风电机组的运行、谐波谐振及抑制进行了报道^[5-12]。文献[5]研究了电网谐波对双馈风电机组

输出特性的影响, 提出了一种非理想电网条件下的 PR 控制策略, 对于电网谐波引起的风电系统输出功率及转矩的脉动具有一定的抑制作用。文献[6]提出了一种虚拟变阻尼控制策略以抑制由于变流器与电网阻抗形成的高次谐波与谐振, 未涉及电网特征次低次谐波运行与抑制。本文针对大容量双馈风电机组电网背景特征次谐波运行与抑制技术进行研究, 以期解决中国风电发展中遇到的低次谐波放大与谐振问题。

为此, 本文建立了电网 5 次、7 次谐波电压下双馈发电机的特征谐波模型, 研究了电网背景谐波电压对双馈发电机定子电流畸变和电磁转矩脉动的影响; 在此基础上, 提出并设计了比例-积分-谐振 (PIR) 控制器, 抑制了双馈风电机组定子电流谐波放大, 消除了电网背景低次谐波产生的风电机组转矩脉动; 通过仿真与现场试验证明了理论分析的准确性与谐波抑制策略的有效性。

1 电网背景谐波双馈发电机建模与分析

实际电网的背景谐波通常是各种整流负荷造成的, 以 5、7、11、13 次谐波为主^[13]。相对而言, 电网电压中 11、13 次谐波成分较小, 同时受大容量变流器开关频率限值及控制特性所限, 为突出重点, 忽略较高频率的 11、13 次谐波, 本文主要针对 5、7 次谐波进行研究。当电网电压发生畸变时, 电网电压主要由工频分量、5 次和 7 次谐波分量组成, 对于双馈电机变流器来说, 静止坐标系中的电网电压和电流都同时存在着 3 种分量, 即以同步旋转角速度 ω_1 正向旋转的基频分量、以 $5\omega_1$ 负向旋转的 5 次谐波分量和以 $7\omega_1$ 正向旋转的 7 次谐波分量, 各矢量关系图如图 1 所示。

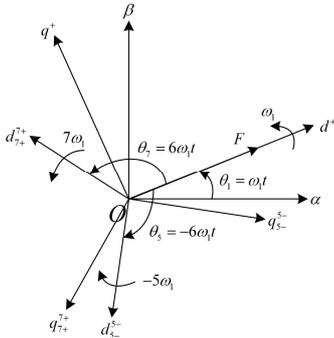


图 1 5、7 次谐波同步旋转坐标系矢量图

Fig. 1 Vector of fundamental, 5th and 7th harmonics under rotation (dq) coordinate frame

正转同步坐标系下双馈发电机等效电路如图 2 所示, 考虑 5、7 次谐波的双馈发电机在正转 dq 同步旋转坐标系中的电压、磁链、转矩方程可表示如

式(1)~式(3)。

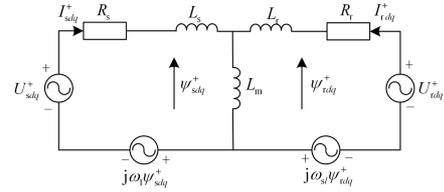


图 2 正转同步坐标系定子电压定向的 DFIG 等效电路
Fig. 2 Equivalent circuit of DFIG based on stator voltage oriented in forward synchronous coordinate system

$$\begin{cases} \psi_{sdq}^+ = L_s I_{sdq}^+ + L_m I_{rdq}^+ \\ \psi_{rdq}^+ = L_r I_{rdq}^+ + L_m I_{sdq}^+ \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} U_{sdq}^+ = R_s I_{sdq}^+ + p\psi_{sdq}^+ + j\omega_1 \psi_{sdq}^+ \\ U_{rdq}^+ = R_r I_{rdq}^+ + p\psi_{rdq}^+ + j\omega_{sl} \psi_{rdq}^+ \end{cases} \quad (2)$$

$$T_e = n_p L_m (i_{sq}^+ i_{rd}^+ - i_{sd}^+ i_{rq}^+) \quad (3)$$

其中

$$U_{sdq}^+ = U_{sdq+}^+ + U_{sdq5-}^{5-} e^{-6j\omega_1 t} + U_{sdq7+}^{7+} e^{6j\omega_1 t}$$

$$U_{rdq}^+ = U_{rdq+}^+ + U_{rdq5-}^{5-} e^{-6j\omega_1 t} + U_{rdq7+}^{7+} e^{6j\omega_1 t}$$

$$I_{sdq}^+ = I_{sdq+}^+ + I_{sdq5-}^{5-} e^{-6j\omega_1 t} + I_{sdq7+}^{7+} e^{6j\omega_1 t}$$

$$I_{rdq}^+ = I_{rdq+}^+ + I_{rdq5-}^{5-} e^{-6j\omega_1 t} + I_{rdq7+}^{7+} e^{6j\omega_1 t}$$

$$\psi_{sdq}^+ = \psi_{sdq+}^+ e^{j\omega_1 t} + \psi_{sdq5-}^{5-} e^{-6j\omega_1 t} + \psi_{sdq7+}^{7+} e^{6j\omega_1 t}$$

$$\psi_{rdq}^+ = \psi_{rdq+}^+ + \psi_{rdq5-}^{5-} e^{-6j\omega_1 t} + \psi_{rdq7+}^{7+} e^{6j\omega_1 t}$$

式中: U_{sdq+}^+ 、 U_{sdq5-}^{5-} 和 U_{sdq7+}^{7+} 分别表示正转 dq 旋转坐标系中定子电压矢量、基波分量、5 次和 7 次谐波分量; i_{sdq+}^+ 、 i_{sd5-}^{5-} 和 i_{sd7+}^{7+} 分别表示正转 dq 旋转坐标系中定子电流矢量、基波分量、5 次和 7 次谐波分量; U_{rdq+}^+ 、 U_{rdq5-}^{5-} 和 U_{rdq7+}^{7+} 分别表示正转 dq 旋转坐标系中转子电压矢量、基波分量、5 次和 7 次谐波分量; i_{rdq+}^+ 、 i_{rdq5-}^{5-} 和 i_{rdq7+}^{7+} 分别表示正转 dq 旋转坐标系中转子电流矢量、基波分量、5 次和 7 次谐波分量; ψ_{sdq+}^+ 、 ψ_{sdq5-}^{5-} 和 ψ_{sdq7+}^{7+} 分别表示正转 dq 旋转坐标系中定子磁链矢量、基波分量、5 次和 7 次谐波分量; ψ_{rdq+}^+ 、 ψ_{rdq5-}^{5-} 和 ψ_{rdq7+}^{7+} 分别表示正转 dq 旋转坐标系中转子磁链矢量、基波分量、5 次和 7 次谐波分量; $e^{-j6\omega_1 t}$ 和 $e^{j6\omega_1 t}$ 分别表示以 6 倍电网频率顺时针旋转和逆时针旋转因子; R_s 、 R_r 分别表示定、转子电阻; L_s 、 L_r 、 L_m 分别表示 dq 坐标系下定转子等效自感及定转子等效互感; ω_1 为同步旋转角频率; ω_{sl} 为转差角频率; n_p 为发电机极对数。

双馈发电机输出电磁功率如式(4)所示。

$$T_e = 1.5 n_p \operatorname{Re}(j \psi_{sdq+}^+ \hat{i}_{sdq+}^+) \quad (4)$$

由式(1)一式(4)可得电网电压 5、7 次谐波下电磁转矩表达式如式(5)所示。

$$\begin{aligned} T_e^1 &= 1.5 \frac{n_p}{\omega_1} \operatorname{Re} \left[u_{sdq+}^+ \hat{i}_{sdq+}^+ - \frac{u_{sdq-}^{5-} \cdot \hat{i}_{sdq-}^{5-}}{5} + \frac{u_{sdq+}^{7+} \cdot \hat{i}_{sdq+}^{7+}}{7} \right] \\ T_e^6 &= 1.5 \frac{n_p}{\omega_1} \operatorname{Re} \left[(u_{sdq+}^+ \hat{i}_{sdq+}^{7+} - \frac{u_{sdq-}^{5-} \cdot \hat{i}_{sdq+}^{7+}}{5}) e^{-j6\omega_1 t} + \right. \\ &\quad \left. (u_{sdq+}^+ \cdot \hat{i}_{sdq-}^{5-} + \frac{u_{sdq+}^{7+} \cdot \hat{i}_{sdq+}^{7+}}{7}) e^{j6\omega_1 t} \right] \\ T_e^{12} &= 1.5 \frac{n_p}{\omega_1} \operatorname{Re} \left[-\left(\frac{u_{sdq-}^{5-} \cdot \hat{i}_{sdq+}^{7+}}{5} \right) e^{-j12\omega_1 t} + \left(\frac{u_{sdq+}^{7+} \cdot \hat{i}_{sdq-}^{5-}}{7} \right) e^{j12\omega_1 t} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中, T_e^1 、 T_e^6 和 T_e^{12} 分别为电磁转矩基波成分、6 倍频脉动成分和 12 倍频脉动成分。

由上式可以看出电磁转矩直流分量是由基波与谐波共同作用引起的;6 倍频脉动分量是由基波与 5 次分量, 基波与 7 次分量作用引起的;12 倍频分量是由 5 次和 7 次分量作用引起的。电网电压背景谐波将加重电磁转矩脉动分量, 尤其是电磁转矩中的 6 倍频分量, 而电磁转矩的 12 倍频分量是由 5 次谐波与 7 次谐波引起的, 考虑到电网电压谐波含量较小, 故电磁转矩 12 倍频分量可以忽略。

2 电网背景低次谐波抑制策略

2.1 电网背景谐波下双馈风电机组控制目标

本文以消除DFIG定子谐波电流为控制目标。当电网电压含有5次、7次谐波时, 忽略定子电阻影响, 稳态情况下定子电压方程可表示为

$$\begin{cases} u_{sdq+}^+ = j\omega_1 \psi_{sdq+}^+ \\ u_{sdq5-}^{5-} = -5j\omega_1 \psi_{sdq5-}^{5-} \\ u_{sdq7+}^{7+} = 7j\omega_1 \psi_{sdq7+}^{7+} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)可进一步分解为

$$\begin{cases} \psi_{sd+}^+ = \frac{u_{sq+}^+}{\omega_1} \\ \psi_{sq+}^+ = -\frac{u_{sd+}^+}{\omega_1} \\ \psi_{sd5-}^{5-} = -\frac{u_{sq5-}^{5-}}{5\omega_1} \\ \psi_{sq5-}^{5-} = \frac{u_{sd5-}^{5-}}{5\omega_1} \\ \psi_{sd7+}^{7+} = \frac{u_{sq7+}^{7+}}{7\omega_1} \\ \psi_{sq7+}^{7+} = -\frac{u_{sd7+}^{7+}}{7\omega_1} \end{cases} \quad (7)$$

基于定子电压定向, 则有:

$$u_{sd+}^+ = u_{sd5-}^{5-} = u_{sd7+}^{7+} = 0 \quad (8)$$

$$\psi_{sq+}^+ = \psi_{sq5-}^{5-} = \psi_{sq7+}^{7+} = 0 \quad (9)$$

为有效抑制定子谐波电流, 令 $i_{sdq5-}^{5-} = i_{sdq7+}^{7+} = 0$,

可得:

$$\begin{cases} \frac{1}{L_s} (\psi_{sdq5-}^{5-} - L_m \cdot I_{rdq5-}^{5-}) = 0 \\ \frac{1}{L_s} (\psi_{sdq7+}^{7+} - L_m \cdot I_{rdq7+}^{7+}) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

将式(7)一式(9)代入式(10)求解可得转子电流控制指令:

$$\begin{cases} i_{rd5-}^{5-*} = -\frac{u_{sq5-}^{5-}}{5L_m\omega_1} \\ i_{rq5-}^{5-*} = \frac{u_{sd5-}^{5-}}{5L_m\omega_1} = 0 \\ i_{rd7+}^{7+*} = \frac{u_{sq7+}^{7+}}{7L_m\omega_1} \\ i_{rq7+}^{7+*} = -\frac{u_{sd7+}^{7+}}{7L_m\omega_1} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

2.2 基于 PIR 调节器的谐波抑制策略

如前所述, 当电网中含有5次、7次谐波时, 在 dq 正向旋转坐标系下的双馈电机的机侧与网侧在除了基频分量之外还存在6倍频脉动, 因此, 控制策略中的电流参考值由直流分量和6倍频交流分量组成, 分别可通过传统PI调节器和R(谐振)调节器实现准确无差跟踪控制。

PIR调节器的传递函数为

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{2K_r\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (\pm 6\omega_1)^2} \quad (12)$$

其中: K_p 为比例系数; K_i 为积分时间常数; K_r 为谐振增益; ω_c 为R调节器带宽系数, ω_1 为电网基频分量频率, 则 $6\omega_c$ 为谐振部分的谐振点频率。

图3给出了PIR调节器与传统PI调节器的幅频和相频特性。

其中: PIR调节器中, $K_p=1$, $K_i=1$, $K_r=1000$, $\omega_c=5$ rad/s; PI调节器中, $K_p=1$, $K_i=1$ 。可以看出, PIR调节器具有PI调节器中PI部分的功能, 即对直流有较大的增益, 这样就确保了PIR对直流量的良好调节能力。而同时, PIR调节器中的谐振部分在谐振频率点处的增益为60 dB左右, 对6倍频交流信号有良好的动态响应。

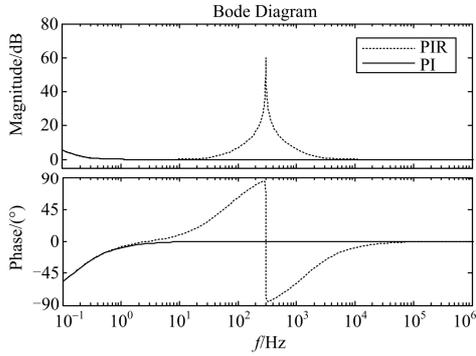


图 3 PIR 和 PI 调节器波特图

Fig. 3 Bode chart of PIR and PI controller

图4是不同带宽系数时的PIR调节器波特图, 从图中可以看出, 带宽系数 ω_c 越大, 谐振调节器带宽越大。 ω_c 越小, 对谐振频率的动态响应越好, 但对频率的自适应效果越差。因此在实际应用中, 合理选取带宽系数既能获得良好的动态响应, 也能满足一定范围内的电网频率波动的自适应响应。

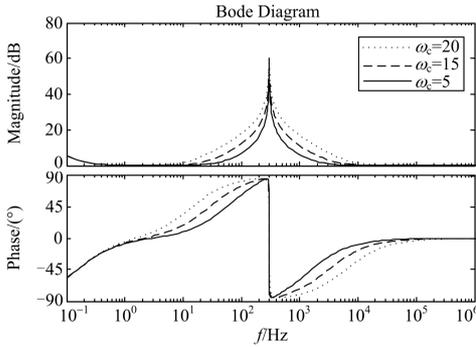


图 4 不同带宽系数时的 PIR 调节器波特图

Fig. 4 Bode chart under different values of ω_c

基于上述分析, 可得采用基于PIR调节器的双馈风力发电机定子谐波电流闭环控制结构, 如图5所示。

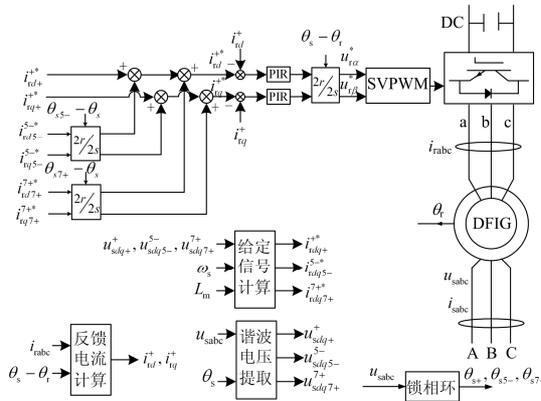


图 5 基于定子谐波电流闭环的DFIG控制框图

Fig. 5 Schematic diagram of proposed control for DFIG based on loop of stator harmonic current

3 仿真结果与分析

为验证理论分析及 PIR 谐波抑制的正确性、有效性, 在 Matlab/Simulink 中建立了 1.5 MW 双馈风电机组电磁暂态仿真模型, 仿真研究风电机组电网谐波运行特性及谐波抑制情况。仿真模型主要由风速模型、风力机模型、传动链模型、发电机变流器模型、主控系统模型、电网模型六大部分组成, 系统仿真结构图如图 6 所示, 仿真用双馈风电机组参数如表 1 所示。

表 1 仿真分析用某 1.5 MW 风电机组参数

Table 1 Simulation analysis parameters of 1.5 MW wind turbine

风电机组参数	参数值
额定功率/kW	1 500
风轮直径/m	77
扫略面积/m ²	4 654
开关频率/kHz	2
齿轮箱变比	1:93.6
定子等效感抗/Ω	0.027 1
定子电阻/Ω	0.001 8
转子等效感抗/Ω	0.115 4
转子电阻/Ω	0.006 1
机电时间常数	0.02
转矩-转速斜率	500
发电机电极对数	2

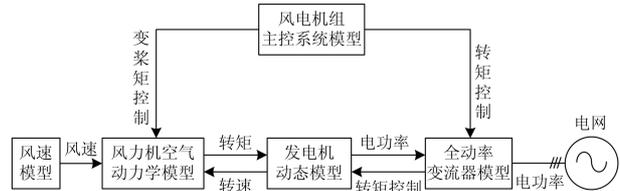


图 6 双馈风电机组谐波运行仿真结构图

Fig. 6 Simulation diagram of harmonic operation for DFIG-WT

图 7 为双馈风电机组谐波运行及谐波抑制的全过程仿真波形图, 图 7(a)~7(c)分别为双馈发电机定子三相电流、有功无功功率及电磁转矩仿真波形图。为突出重点, 仿真采用风速为 8.5 m/s 恒定风速, 设定电网电压中始终存在的 5 次谐波电压含有率为 5%, 7 次谐波电压含有率为 3%。为方便对比研究, 起初风电机组在电网谐波电压情况下稳定运行, PIR 谐波抑制未使能, 由图 7 可以看出: 双馈发电机定子电流畸变严重, 输出功率与电磁转矩脉动明显, 双馈电机定子电流畸变明显, 5 次谐波电流含有率为 3.63%, 7 次谐波电流含有率为 1.82%; 定子

输出有功功率脉动约为 0.1 p.u., 无功功率脉动约为 0.05 p.u.; 发电机电磁转矩严重脉动。在 0.05 s 时, PIR 谐波抑制使能, 双馈发电机定子电流畸变、功率与电磁转矩脉动明显好转, 5 次谐波电流含有率降为 0.2%, 7 次谐波电流含有率降为 0.12%; 定子输出有功功率脉动降为 0.03 p.u., 无功功率脉动降为 0.014 p.u.; 发电机电磁转矩脉动基本消除。显然, 基于 PIR 调节器的双馈风力发电机定子谐波电流闭环控制策略可有效抑制电网背景谐波所引起的双馈风电机组功率与转矩脉动, 对于风电机组稳定运行、疲劳寿命及电网安全意义重大。

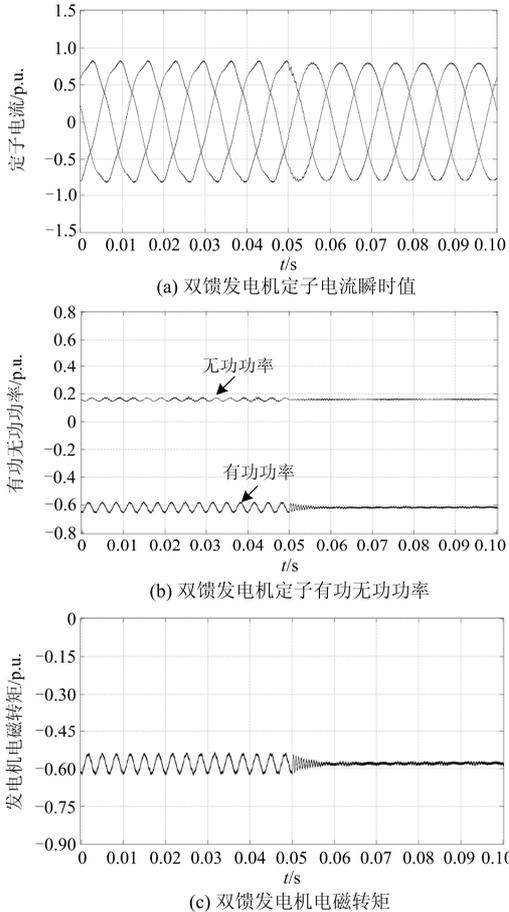


图 7 双馈风电机组谐波运行与抑制仿真波形

Fig. 7 Simulation waveforms of harmonic operation and suppression of DFIG-WT

4 现场试验研究

风电机组谐波运行与抑制现场试验原理图如图8所示, 将电网谐波电压发生装置串联于风电机组升压变压器高压侧与中压电网之间, 利用谐波电压发生装置在风电机组升压变压器高压侧模拟产生电网背景谐波, 从而模拟复现风电机组谐波运行与谐

波抑制的全过程, 验证理论分析与谐波抑制策略的准确性与有效性, 试验用风电机组参数见表1。其中试验用谐波电压发生装置基于双向交一直一交全功率变流原理, 通过修改网侧变流器调制波指令, 即可输出试验所需的特征次谐波电压, 谐波发生装置输出阻抗由变流系统控制与硬件参数共同决定^[14]。

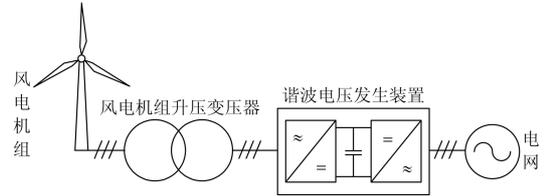


图 8 风电机组谐波测试原理图

Fig. 8 Test schematic diagram for wind turbine harmonic testing

风电机组正常运行时, 通过谐波电压发生装置在风电机组升压变压器高压侧施加5次和7次谐波电压, 谐波电压含有率分别设为5%和3%。试验过程中, 双馈变流器采用阶跃控制方式, 即风电机组起初在传统PI控制下运行, 在预定时刻, 使能PIR谐波抑制控制, 切入前后双馈风电机组运行情况如图9所示, 图9(a)为试验过程中双馈发电机输出有功无功功率, 图9(b)为双馈发电机电磁转矩, 可以看出采用PI控制时, 双馈输出功率及电磁转矩严重脉动, 当切换至PIR控制时, 有功功率、无功功率及电磁转矩的6倍频脉动基本得到抑制。

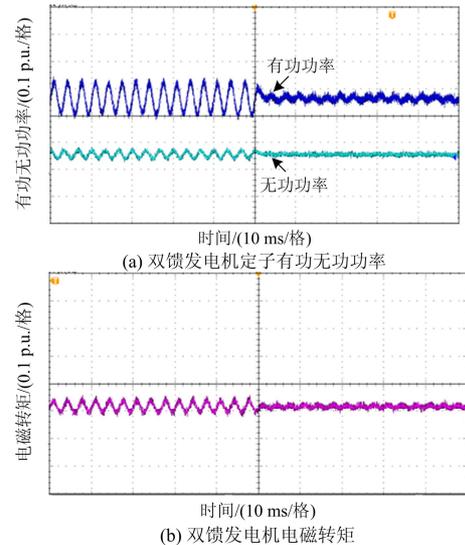


图 9 双馈风电机组谐波运行与抑制仿真波形

Fig. 9 Experimental waveforms of harmonic operation and suppression of DFIG-WT

试验结果可以看出, 采用传统PI控制定、转子电流明显畸变、有功、无功功率及电磁转矩脉动较大, 影响了双馈电机的正常运行。本文采用基于PIR

调节的定子谐波电流闭环控制可以有效地抑制定子电流谐波、有功、无功功率和电磁转矩脉动。

5 结论

(1) 电网特征低次谐波会引起双馈风电机组定子电流畸变、功率及电磁转矩脉动, 传统基于PI控制的双馈电机双闭环控制无法抑制定子电流谐波和转矩脉动, 对风电机组的疲劳寿命及并网电能质量影响重大。

(2) 基于PIR调节的定子谐波电流闭环控制可以有效地抑制定子电流谐波、有功、无功功率和电磁转矩脉动, 且鲁棒性强和控制简单, 对双馈风电机组低次谐波振荡问题的解决具有现实的指导意义。

参考文献

- [1] G5/4-1 Managing harmonics-a guide to ENA engineering recommendation[S]. 2005.
- [2] IEEE Standard 519-1992 IEEE.recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems[S]. 1993.
- [3] 贺益康, 胡家兵. 双馈异步风力发电机并网运行中的几个热点问题[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27): 1-15.
HE Yikang, HU Jiabing. Several hot-spot issues associated with the grid-connected operations of wind-turbine driven doubly fed induction generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(27): 1-15.
- [4] 年珩, 曾嵘. 分布式发电系统离网运行模式下输出电能质量控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 22-28.
NIAN Heng, ZENG Rong. Control technique on output power quality for distributed generation system under stand-alone operation mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 22-28.
- [5] 殷桂梁, 陈学琴, 马会艳, 等. 电网谐波条件下双馈风电系统输出特性分析与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 79-84.
YIN Guiliang, CHEN Xueqin, MA Huiyan, et al. Analysis and control of doubly-fed wind generation system's output characteristics under harmonic grid voltage conditions[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 79-84.
- [6] 秦世耀, 李少林, 王瑞明, 等. 大容量永磁同步风电机组系统谐振与抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22): 11-16.
QIN Shiyao, LI Shaolin, WANG Ruiming, et al. Study on resonance and suppression strategy of large-capacity permanent magnet synchronous generator system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 11-16.
- [7] MUNJI K K, BHIMASINGU R. Mitigation of harmonics in grid integrated wind farms[C] // International Conference on Power and Energy Systems, December 22-24, 2011, Chennai, India.
- [8] 高吉磊, 张雅静, 林飞, 等. 单相 PWM 整流器谐波电流抑制算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(21): 32-39.
GAO Jilei, ZHANG Yajing, LIN Fei, et al. Research on harmonic current elimination method of single-phase PWM rectifier[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(21): 32-39.
- [9] MATH H J, BOLLEN M H J, YANG K. Harmonic aspects of wind power integration[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(1): 13-19.
- [10] 刘其辉, 韩贤岁. 双馈风电机组的通用型机电暂态模型及其电磁暂态模型的对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 89-94.
LIU Qihui, HAN Xiansui. Comparative study on electromechanical and electromagnetic transient model for grid-connected DFIG[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 89-94.
- [11] 张慧玲, 郝思鹏, 袁越, 等. 基于实测数据的双馈风电机组外特性研究及简化建模[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 82-87.
ZHANG Huiling, HAO Sipeng, YUAN Yue, et al. Research on external characteristics of DFIG and simplified modeling based on testing data[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 82-87.
- [12] BADRZADEH B, GUPTA M. Power system harmonic analysis in wind power plants part II: practical experiences and mitigation methods[C] // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, October 7-11, 2012, Las Vegas, USA.
- [13] 赵霞, 王倩, 邵彬, 等. 双馈感应风力发电系统低电压穿越控制策略研究及其分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 57-64.
ZHAO Xia, WANG Qian, SHAO Bin, et al. Low voltage ride through control strategy and its analysis of doubly fed induction generator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 57-64.
- [14] 滕子非, 行武, 张宏图, 等. 风力发电系统短路故障特征分析及对保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 29-36.
TENG Yufei, XING Wu, ZHANG Hongtu, et al. Analysis of characteristics of short circuit fault of wind power system and the impact on the protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 29-36.

收稿日期: 2015-12-16; 修回日期: 2016-03-28

作者简介:

高 骏(1965-), 男, 博士, 高级工程师, 从事高电压技术研究工作等;

王 磊(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事新能源检测及电能质量工作等;

周 文(1978-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电能质量研究工作等。

(编辑 葛艳娜)