

基于 $\alpha\beta$ 坐标系下双馈异步风力发电机串补输电系统 次同步谐振的比例谐振控制

任佳佳¹, 胡应宏², 纪延超¹

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045)

摘要: 针对双馈异步风力发电机(DFIG)串补输电系统中存在的次同步谐振问题,通过建立 DFIG 串补输电系统的数学模型,推导出其传递函数;然后采用基于转子静止坐标系下的 PR 控制来抑制次同步谐振。将系统电流的次同步频率分量转化为转子静止坐标系下的 $\alpha\beta$ 分量,使 PR 控制的谐振频率点与次同步频率转子静止坐标系下的 $\alpha\beta$ 分量相吻合,用风力发电机实现对次同步谐振的抑制。通过算例仿真分析、硬件在环实验,验证了所提控制策略的有效性和正确性,以及所提方法具有计算简单、便于实现的优点。

关键词: 比例谐振控制; 双馈异步风力发电机; 串补; 输电系统; 次同步谐振; 风电

中图分类号: TM 315

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.09.012

0 引言

大容量远距离输电是我国风力发电发展的主要特点,串补输电系统是提升风电输送能力的重要手段,已经在国内得到了广泛的应用^[1-3]。集群风电经串补输电系统送出时其运行特性复杂,可能面临次同步谐振(SSR)等风险,美国德州、我国华北某地区和东北某地区等都先后发生过与风电有关的次同步谐振现象。我国华北地区因其风电并网规模大、谐振发生次数多而最具典型性^[4],受到了广泛关注。

风电串补输电系统次同步谐振的机理分析、建模与谐振抑制成为亟待解决的问题^[5-7]。在次同步谐振机理分析方面,文献[8-10]对双馈异步风力发电机(DFIG)串补输电系统次同步谐振的 3 种机理进行了分析;文献[11-12]对风电串补输电系统次同步谐振的特性及影响因素进行了分析。在建模方面,文献[13]通过建立阻抗模型来分析风电串补输电系统次同步谐振现象,确定串联补偿度、风速以及电流控制参数对次同步谐振的影响。在抑制措施方面,文献[14-15]提出了基于转子侧变流器的有功、无功调节方法;文献[16]采用静止无功补偿器(STATCOM)来抑制次同步谐振和阻尼电力系统振荡,并将非线性优化设计的步骤用于 STATCOM 中附加次同步阻尼控制环的设计;文献[17]利用机轴角速度作为输入信号,实现了双馈异步风力发电机的附加阻尼控制;文献[18]通过改进统一潮流控制器(UPFC)的控制策略,增加桨距角附加控制来实现对次同步谐振的抑制;文献[19]根据转子角相位差进行有功功率调节,从而实现双馈异步风力发

电机的阻尼控制。

附加阻尼控制的实现,需要提取阻尼信号,如采用滤波、相移等,还需阻尼控制器,实现复杂。相对于 $\alpha\beta$ 坐标系下的谐振控制, dq 坐标系下存在计算复杂的问题,该问题一方面是由 abc 坐标到 dq 坐标的变换引起的;另一方面是在变换过程中,谐振频率也会随着变换,存在 2 种频率分量,也就是需要 2 个谐振频率控制器,而变换到 $\alpha\beta$ 坐标不涉及该变换,可以省略 1 个控制器,故而简化了计算,提高了计算效率,便于实现。电网侧集中抑制确实比在风电场内部抑制更合适、更经济,但集中抑制措施的实施影响较大、实施周期较长,而对风力发电机的改造更具灵活性。从学术上,在风电场内部抑制,实施灵活、改造方便、成本低、实施周期短,可以根据系统规划与设计,风力发电机并网时便具有抑制次同步谐振的功能,就能从根本上避免次同步谐振的风险,花费的成本最低,所以有必要对抑制措施进行深入的研究。

本文针对华北某地区双馈异步风力发电机串补输电系统的次同步谐振现象,提出基于转子静止坐标系下 $\alpha\beta$ 分量的比例谐振控制。比例谐振控制能够实现在静止坐标系下对次同步信号的无静差调节,将其引入双馈异步风力发电机串补输电系统中的变流器电流调节之中,通过设计使得比例谐振控制的谐振频率点与次同步频率转子静止坐标下的 $\alpha\beta$ 分量相吻合,即可增强双馈异步风力发电机对系统次同步谐振分量的控制,从风力发电机角度实现对次同步谐振的抑制。通过仿真分析与硬件在环实验,结果验证了本文所提方法的有效性和正确性。

1 双馈异步风力发电机串补输电系统数学模型

1.1 双馈异步风力发电机串补输电系统

双馈异步风力发电系统主要由轴系、双馈异步发电机、网侧变流器(GSC)、转子侧变流器(RSC)、变流器直流环节、变流器控制器及箱式变压器组成,具体如图1所示。图中 U_s 为定子电压, i_s 为定子电流, i_n 为网侧变流器电流, i_r 为转子变流器电流, U_{dc} 为直流侧电容电压。

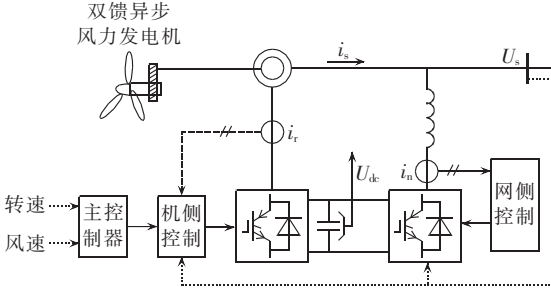


图1 DFIG系统结构图

Fig.1 Schematic diagram of DFIG system

基于 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系下双馈异步风力发电机的定子电压、转子电压与磁链方程如式(1)所示^[20]。

$$\begin{cases} U_{s\alpha\beta} = R_s I_{s\alpha\beta} + p\psi_{s\alpha\beta} \\ U_{r\alpha\beta} = R_r I_{r\alpha\beta} + p\psi_{r\alpha\beta} - j\omega_r \psi_{r\alpha\beta} \\ \psi_{s\alpha\beta} = L_s I_{s\alpha\beta} + L_m I_{r\alpha\beta} \\ \psi_{r\alpha\beta} = L_r I_{r\alpha\beta} + L_m I_{s\alpha\beta} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $U_{s\alpha\beta} = u_{s\alpha} + ju_{s\beta}$, $U_{r\alpha\beta} = u_{r\alpha} + ju_{r\beta}$, $I_{s\alpha\beta} = i_{s\alpha} + ji_{s\beta}$, $I_{r\alpha\beta} = i_{r\alpha} + ji_{r\beta}$, $\psi_{s\alpha\beta} = \psi_{s\alpha} + j\psi_{s\beta}$, $\psi_{r\alpha\beta} = \psi_{r\alpha} + j\psi_{r\beta}$, $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 分别为定子电压 α 、 β 轴分量, $i_{s\alpha}$ 、 $i_{s\beta}$ 分别为定子电流 α 、 β 轴分量, $\psi_{s\alpha}$ 、 $\psi_{s\beta}$ 分别为定子磁链的 α 、 β 轴分量, $u_{r\alpha}$ 、 $u_{r\beta}$ 分别为转子电压 α 、 β 分量, $i_{r\alpha}$ 、 $i_{r\beta}$ 分别为转子电流 α 、 β 轴分量, $\psi_{r\alpha}$ 、 $\psi_{r\beta}$ 分别为转子磁链的 α 、 β 轴分量; R_s 为定子电阻; L_s 、 L_r 、 L_m 分别为定子电感、转子电感、互感; R_r 为转子电阻; ω_r 为转子转速; p 为微分算子。

由式(1)可得基于 $\alpha\beta$ 坐标系下双馈异步风力发电机的等效电路如图2所示。

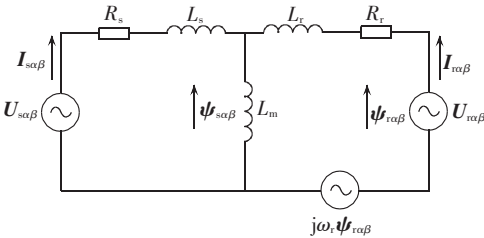


图2 基于 $\alpha\beta$ 静止坐标系下DFIG等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of DFIG based on $\alpha\beta$ axis

由图2可得,基于 $\alpha\beta$ 坐标系下的转子电压方程如式(2)所示。

$$U_{r\alpha\beta} = (R_r - j\omega_r \delta L_r) I_{r\alpha\beta} + \delta L_r p I_{r\alpha\beta} + (L_m / L_s) (U_{s\alpha\beta} - R_s I_{s\alpha\beta} - j\omega_r \psi_{s\alpha\beta}) \quad (2)$$

其中, $\delta = 1 - L_m^2 / (L_r L_s)$ 为双馈电机的漏磁系数。

1.2 $\alpha\beta$ 坐标系下的双馈异步风力发电机控制系统

在式(2)中,将 $\delta L_r p I_{r\alpha\beta}$ 用比例控制替代,得到双馈异步风力发电机 $\alpha\beta$ 坐标系下的控制系统,如图3所示。图中,内环为电流跟踪;外环分别对应转子转速控制和定子无功控制。转子侧变流器的作用主要分为2个方面:一方面是通过控制双馈异步风力发电机的转速,实现最大功率点跟踪,进而控制双馈异步风力发电机定子侧发出的有功功率;另一方面是给双馈异步风力发电机的转子提供励磁分量的电流,从而可以调节双馈异步风力发电机定子侧无功功率。

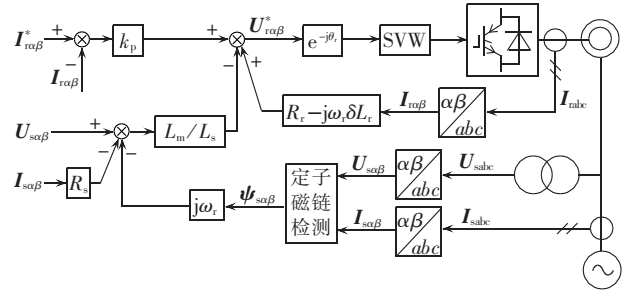


图3 转子侧变流器控制框图

Fig.3 Control schematic diagram of rotor side converter

图3中, k_p 为内环PI控制器的比例系数; $I_{r\alpha\beta}^*$ 为外环生成的电流参考值。转子电压参考值如式(3)所示。

$$U_{r\alpha\beta}^* = (R_r - j\omega_r \delta L_r) I_{r\alpha\beta} + U_{kpr\alpha\beta} + (L_m / L_r) (U_{s\alpha\beta} - R_s I_{s\alpha\beta} - j\omega_r \psi_{s\alpha\beta}) \quad (3)$$

其中, $U_{kpr\alpha\beta} = k_p (I_{r\alpha\beta}^* - I_{r\alpha\beta})$ 。

2 双馈异步风力发电机串补系统的比例谐振控制

2.1 比例谐振控制原理

采用的基于 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系下的比例谐振控制,在谐振频率处增益较大,而在非谐振频率处增益很小。因此,系统在谐振频率处可以实现零稳态误差,能够直接控制交流量,实现对次同步分量的控制,其传递函数如式(4)所示^[20]。

$$G_{pr} = k_p + \frac{k_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (4)$$

其中, k_p 为比例谐振控制器的比例系数; k_r 为谐振系数; ω_0 为谐振频率; ω_c 为截止频率。 k_r 只影响谐振控制器的增益, ω_c 不仅影响比例谐振控制器的增益,还影响比例谐振控制器的带宽,其控制原理如图4所示。

2.2 比例谐振控制的参数设计

根据华北某地区风电串补输电系统谐振的频率

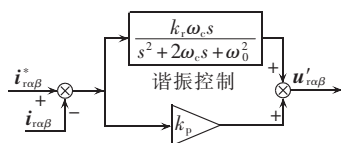


图 4 DFIG 采用的比例谐振控制框图

Fig.4 Schematic diagram of PR control for DFIG

特点可知,谐振频率时间分布有所差异,风力发电机脱网前频率较高,随着风力发电机的脱网,谐振频率逐渐降低,谐振频率分布在 4~8 Hz 范围内,因此需要有针对性地对谐振控制的参数进行调节。所有谐振均发生在风电出力较小时,即谐振发生时刻风速较小。风电最小出力仅为 88 MW,占该地区总装机的 3%,最大出力为 360 MW,也仅占该地区总装机的 13%。谐振发生时,送出功率主要分布在 100~350 MW 之间,谐振发生概率最大时送出功率在 100~250 MW 范围内,该范围的谐振次数占总次数的 80%。根据次同步谐振频率的变化和谐振发生时刻的风速条件,转子工作于 1200 r/min,因此,2 MW 双馈系统的比例谐振控制的参数选取为: $k_p=1.6$, $k_r=5$, $\omega_c=10$ rad/s, $\omega_r=3.14\times 36$ (rad/s)。

3 比例谐振控制仿真分析

3.1 风电串补系统次同步谐振录波数据

在 2010 年 10 月到 2010 年 11 月、2011 年 1 月期间,串补站所有 500 kV 运行线路的串补全部投运,220 kV 风电系统正常送出情况下,500 kV 变电站发生了多次主变异常振动声响的情况,同时该地区多个风电场也出现主变异常声响的情况。通过对故障期间录波数据的分析,发现该地区各风电场和汇集站电流出现了较大幅度的振荡,振荡频率约为 2~5 Hz。2012 年 12 月以后,随着地区新建风电场的大量接入,该地区发生次同步谐振的条件随之发生变化,次同步谐振的发生概率呈增大趋势。通过对录波数据的分析,这一阶段次同步谐振现象也主要表现为该地区各风电场和汇集站的电流中叠加了次同步频率的分量,频率为 6~10 Hz。风电串补输电系统次同步谐振典型的故障录波数据如图 5 所示。

3.2 风电串补系统次同步谐振仿真分析

3.2.1 未采取比例谐振控制的仿真分析

仿真采用 2 MW 双馈异步风力发电机串补输电系统进行暂态时域仿真分析,系统及相应的参数与文献[11-12]中一致,双馈异步风力发电机工作于次同步转速 1200 r/min,机械输入功率 2 MW,在未采取措施时得到的仿真波形如图 6 所示。

从时域波形可以看出,电流中含有 4 Hz 的次同步电流分量,电流大幅谐振;而电压谐振幅值较小,与故障录波情况波形相似,很好地复现了风电串补

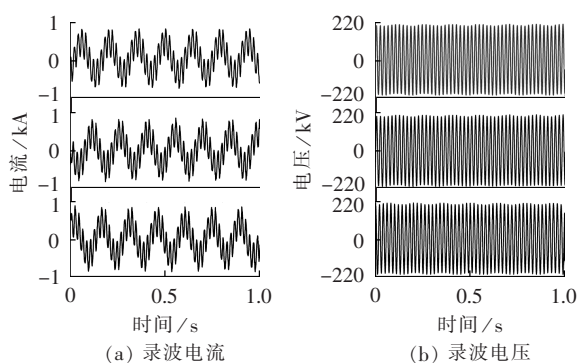


图 5 220 kV 变电站故障录波数据

Fig.5 Waveform of fault recorder at 220 kV station

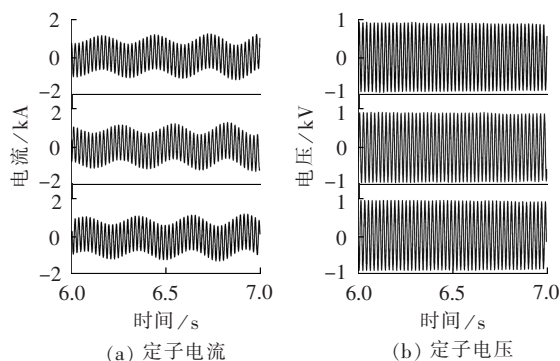
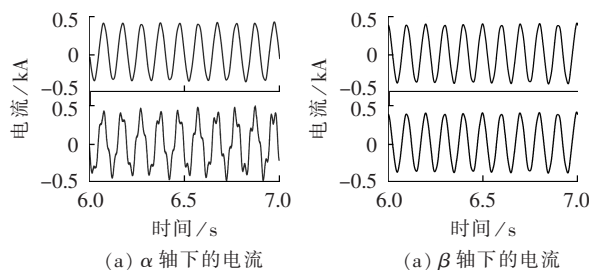


图 6 双馈异步风力发电机定子电流和电压

Fig.6 Stator current and voltage waveform of DFIG

输电系统次同步谐振现象。

发生次同步谐振时,双馈异步风力发电机控制器内环的参考电流与反馈电流如图 7 所示。图中,由上至下依次为相应坐标轴下参考电流和反馈电流的波形曲线。从 $\alpha\beta$ 轴电流的频率来看,参考电流与反馈电流含有其次同步频率分量的互补频率分量为 46 Hz,与前述分析一致。从幅值来看,参考电流小幅波动,该次同步电流分量是由于系统同步造成其含量较低,这表明发生次同步谐振时,控制器外环处于理想工作状态,锁相环等也处于线性工作区,相位误差小;反馈电流中含有较大的次同步电流,是因为缺少相应的抑制措施,故需要对控制器内环控制策略进行改进。

图 7 次同步谐振时的双馈异步风力发电机 α 、 β 轴电流Fig.7 α - and β -axis currents of DFIG under SSR

对 $\alpha\beta$ 坐标下的电流进行 FFT 分析,频谱图如图 8 所示。由于转子本身的旋转,将次同步电流转换至

转子静止坐标轴下,次同步频率为工频与转子转速以及次同步频率之差。在工频 50Hz 条件下,转速为 1200 r/min,次同步谐振频率约为 4 Hz,则转子 $\alpha\beta$ 坐标下次同步电流转换为 36Hz 频率的分量。

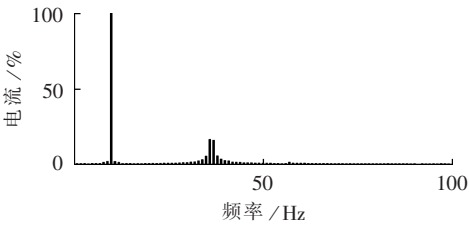


图 8 次同步谐振时 $\alpha\beta$ 坐标下的电流 FFT 幅值
Fig.8 FFT amplitude of $\alpha\beta$ axis current under SSR

3.2.2 采取比例谐振控制时的仿真分析

在控制系统中,加入比例谐振控制器,得到的定子电流和电压仿真波形如图 9 所示。 $\alpha\beta$ 轴下的参考电流与反馈电流如图 10 所示。图中,由上至下依次为相应坐标轴下参考电流和反馈电流的波形曲线。

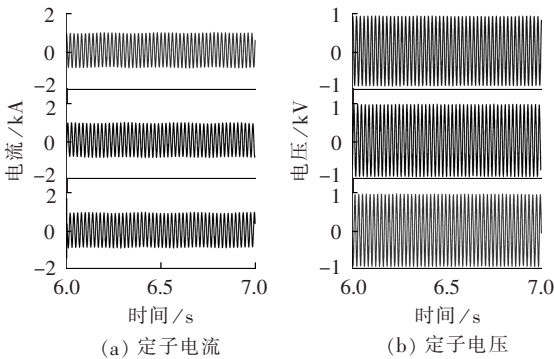


图 9 比例谐振控制下的双馈异步风力发电机定子电流和电压

Fig.9 Stator current and voltage waveform of DFIG under PR control

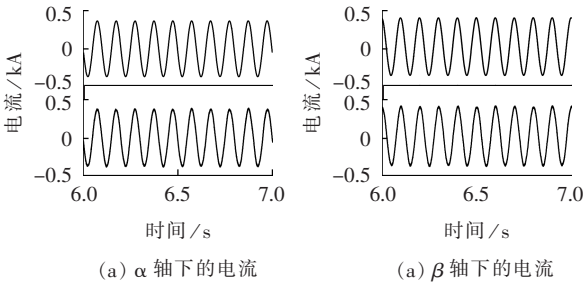


图 10 比例谐振控制下的双馈异步风力发电机 α,β 轴电流

Fig.10 α - and β -axis currents of DFIG under PR control

对比图 6 和图 9、图 7 和图 10 可以看出,通过在控制器中增加对次同步谐振频率点的谐振控制,能够使双馈异步风力发电机增强对该频率点的控制,从而避免次同步谐振,与上述理论分析一致。

4 风电串补系统次同步谐振的硬件在环验证

为了验证本文所采用比例谐振控制策略抑制风

电串补输电系统次同步谐振的正确性,采用 RT-LAB 硬件在环实验平台进行验证。

4.1 未采取比例谐振控制的仿真分析

未采取比例谐振控制时得到的仿真波形如图 11 所示。图中,由上至下依次为定子 a 相电压 u_{sa} 、定子 a 相电流 i_{sa} 、定子 b 相电流 i_{sb} 、定子 c 相电流 i_{sc} 。电压变比为 1000:1,电流变比为 1000:1,仿真步长为 8×10^{-5} s。从波形中可以看出,在没有采取任何措施的情况下,双馈异步风力发电机串补输电系统发生了次同步谐振,其中电压振幅较小,电流振幅较大,与故障录波和时域仿真一致。

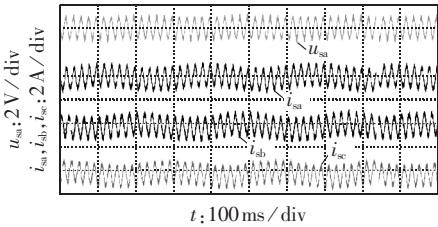


图 11 次同步谐振时双馈异步风力发电机实验波形
Fig.11 Experimental waveform of DFIG under SSR

基于 $\alpha\beta$ 轴下的定子电流波形如图 12 所示。图中,由上至下依次为 α 轴参考电流 $i_{\alpha ref}$ 、 α 轴反馈电流 $i_{\alpha back}$ 、 β 轴参考电流 $i_{\beta ref}$ 、 β 轴反馈电流 $i_{\beta back}$ 。可以看出,由于转子轴的旋转,使得定子电流变换到 $\alpha\beta$ 坐标轴下频率发生了偏移,与理论一致。

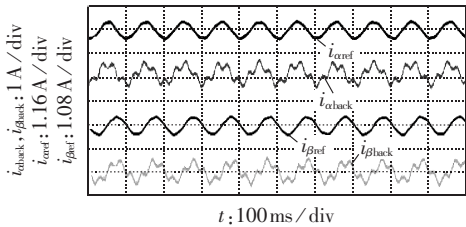


图 12 次同步谐振时双馈异步风力发电机 α,β 轴电流
Fig.12 α - and β -axis currents of DFIG under SSR

4.2 采取比例谐振控制时的仿真

采用如图 4 所示的比例谐振控制,进行硬件在环实验,得到的仿真波形如图 13 所示。 $\alpha\beta$ 轴下的参考电流与反馈电流波形如图 14 所示。双馈异步风力发电机转子输出电压和三相电流如图 15 所示。图中,由上至下依次为转子 a 相电压 u_{ra} 、转子 a 相电流 i_{ra} 、转子 b 相电流 i_{rb} 、转子 c 相电流 i_{rc} 。可以看出,

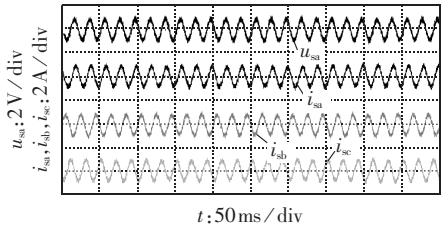


图 13 比例谐振控制下双馈异步风力发电机的实验波形
Fig.13 Experimental waveform of DFIG under PR control

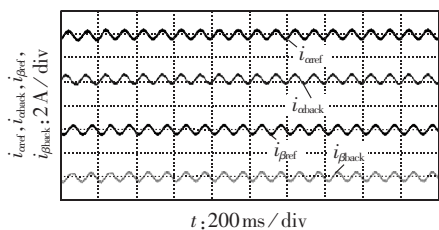


图 14 比例谐振控制下双馈异步风力发电机 α 、 β 轴电流

Fig.14 α - and β -axis currents of DFIG under PR control

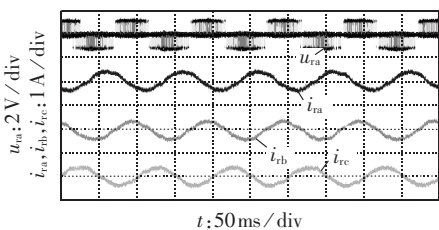


图 15 比例谐振控制下 DFIG 转子电压电流

Fig.15 Rotor voltage and current of DFIG under PR control

反馈电流中没有次同步谐振分量。对比图 11 和图 13、图 12 和图 14 可以看出,通过引入对次同步谐振频率点的谐振控制,能够增强谐振点的控制能力,有效避免双馈异步风力发电机串补输电系统的次同步谐振,与理论和时域仿真一致。

减小比例系数,当 $k_p=0.6$ 时,进行实时仿真,得到仿真波形如图 16 所示。从图中可以看出,通过减小比例系数,控制器在次同步谐振下的等效阻尼减小,抑制效果变差。

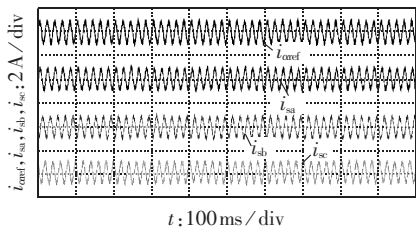


图 16 $k_p=0.6$ 时双馈异步风力发电机的实验波形

Fig.16 Experimental waveforms of DFIG when $k_p=0.6$

5 结论

本文针对华北某地区风电串补输电系统的次同步谐振问题,采用了基于 $\alpha\beta$ 两相静止坐标系下的比例谐振控制算法,设计了控制器的相应参数。通过使控制器在系统串补谐振点发生谐振,增强系统在串补谐振点上的控制能力,从而使得在次同步频率下变流器呈现正电阻性,能够有效抑制风电串补系统中的次同步谐振现象。通过故障录波、仿真分析、硬件在环实验,验证了所提方法能够有效抑制风电串补系统中的次同步谐振现象。

参考文献:

[1] 汤蕾,沈沉,张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(一):理论基础[J]. 中国电机工程学报,2015,35

(15),3832-3842.

TANG Lei, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power systems-part I: theoretical foundation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3832-3842.

[2] 汤蕾,沈沉,张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(二):影响因素分析[J]. 中国电机工程学报,2015, 35(16):4043-4051.

TANG Lei, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power system-part II: factors affecting transient angle stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4043-4051.

[3] 关永刚,郭珏琪,项涛涛,等. 特高压串补线路短路电流的延时过零特性[J]. 中国电机工程学报,2015,35(11):2879-2886.

GUAN Yonggang, GUO Peiqi, XIANG Zutao, et al. Characteristics of the delayed current-zero crossing of short-circuit current occurred in the UHV series compensated transmission line [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2879-2886.

[4] 陈实,李兴源,李宽. 光伏并网附加控制抑制交流串补引起的次同步谐振[J]. 电力自动化设备,2016,36(1):24-29.

CHEN Shi, LI Xingyuan, LI Kuan. Supplementary photovoltaic grid-connection control for damping SSR induced by series capacitive compensation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 24-29.

[5] 董晓亮,谢小荣,李江,等. 大型风电场中不同位置的风机对次同步谐振特性影响程度的比较分析[J]. 中国电机工程学报,2015, 35(20):5173-5180.

DONG Xiaoliang, XIE Xiaorong, LI Jiang, et al. Comparative study of the impact on subsynchronous resonance characteristics from the different location of wind generators in a large wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(20): 5173-5180.

[6] 栗然,卢云,刘会兰,等. 双馈风电场经串补并网引起次同步振荡机理分析[J]. 电网技术,2013,37(11):3073-3079.

LI Ran, LU Yun, LIU Huilan, et al. Mechanism analysis on subsynchronous oscillation caused by grid-integration of doubly fed wind power generation system via series compensation[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3073-3079.

[7] FAN L, KAVASSERI R, MIAO Z L, et al. Modeling of DFIG-based wind farms for SSR analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2073-2082.

[8] OSTADI A, YAZDANI A, VARMA R K. Modeling and stability analysis of a DFIG-based wind-power generator interfaced with a series-compensated line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1504-1514.

[9] FAN L, MIAO Z. Mitigating SSR using DFIG-based wind generation[J]. IEEE Transactions on sustainable energy, 2012, 3(3): 349-358.

[10] 张剑,肖湘宁,高本锋,等. 双馈风力发电机的次同步控制相互作用机理与特性研究[J]. 电工技术学报,2013,28(12):142-149.

ZHANG Jian, XIAO Xiangning, GAO Benfeng, et al. Mechanism and characteristic study on sub-synchronous control interaction of a DFIG-based wind-power generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 142-149.

[11] 高本锋,李忍,杨大业. 双馈风电机组次同步振荡阻尼特性与抑制策[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):11-19.

GAO Benfeng, LI Ren, YANG Daye. Damping characteristics and countermeasure of DFIG sub-synchronous oscillation[J].

- Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):11-19.
- [12] 董晓亮,谢小荣,刘辉,等. 双馈风力发电机串补输电系统全运行区域的次同步特性分析[J]. 电网技术,2014,38(9):2429-2433. DONG Xiaoliang,XIE Xiaorong,LIU Hui,et al. SSR characteristics of a wind farm connected to series-compensated transmission system under all operation region of DFIG[J]. Power System Technology,2014,38(9):2429-2433.
- [13] 董晓亮,谢小荣,杨煜,等. 双馈风机串补输电系统次同步谐振影响因素及稳定区域分析[J]. 电网技术,2015,39(1):189-193. DONG Xiaoliang,XIE Xiaorong,YANG Yu,et al. Impacting factors and stable area analysis of subsynchronous resonance in DFIG based wind farms connected to series-compensated power system[J]. Power System Technology,2015,39(1):189-193.
- [14] MIAO Z. Impedance-model-based SSR analysis for type 3 wind generator and series-compensated network[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2012,27(4):984-991.
- [15] FAN L,ZHU C,MIAO Z,et al. Modal analysis of a DFIG-based wind farm interfaced with a series compensated network [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2011,26 (4): 1010-1020.
- [16] MEI F,PAL B. Modal analysis of grid-connected doubly fed induction generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2007,22(3):728-736.
- [17] FAN L,YIN H,MIAO Z. On active/reactive power modulation of DFIG-based wind generation for interarea oscillation damping[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2011,26 (2):513-521.
- [18] MIAO Z,FAN L,OSBORN D,et al. Control of DFIG-based wind generation to improve interarea oscillation damping [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2009,24(2):415-422.
- [19] EL-MOURS M S,BAK-JENSEN B,ABDEL-RAHMAN M H. Novel STATCOM controller for mitigating SSR and damping power system oscillations in a series compensated wind park [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2010,25(2):429-441.
- [20] 许伯强,张舒怡. 定子故障下的双馈风力发电机组建模与稳定性分析[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):93-99. XU Boqiang,ZHANG Shuyi. Modeling and stability analysis of DFIG with stator fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,36(9):93-99.

作者简介:



任佳佳(1985—),女,山西吕梁人,博士研究生,研究方向为新能源并网稳定与控制(E-mail:jjr_hit@163.com)。

PR control of sub-synchronous resonance in DFIG connected to series compensated power transmission system based on $\alpha\beta$ axis

REN Jiajia¹,HU Yinghong²,JI Yanchao¹

(1. School of Electrical Engineering & Automation,Harbin Institute of Technology,Harbin 150001,China;

2. North China Electric Power Research Institute Co.,Ltd.,Beijing 100045,China)

Abstract: According to the sub-synchronous resonance of DFIG(Doubly-fed Induction Generator) connected to series compensation transmission system,the transfer function is formulated via establishing a mathematical model of DFIG series compensated transmission system. PR control based on static rotor axis is used to suppress the sub-synchronous resonance. By transforming the sub-synchronous frequency component of the system current into $\alpha\beta$ component that based on static rotor axis,the frequency of the $\alpha\beta$ component can coincide with the resonant frequency of PR control. As such,the control strategy can enhance the suppression of the sub-synchronous resonance from the rotor side converter of the wind turbine. The validity and effectiveness of the proposed control strategy are proved by simulative results.

Key words: proportional resonant control; doubly-fed induction generator; series compensation; transmission system; sub-synchronous resonance; wind power