

基于 SVG 的双馈风电场电压稳定控制策略研究^{*}

邹 赞, 王维庆, 王海云

(新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘 要: 双馈异步发电机 (DFIG) 在大规模风电并网环境下提供的无功功率无法满足并网需求。虽然引入固定电容器能够提供无功补偿, 但系统受功率耦合的影响无法有效实时维持电压稳定。提出了一种静止无功发生器 (SVG) 与 DFIG 协调补偿无功的控制策略, 同时引入电力系统稳定器 (PSS) 抑制系统的低频振荡, 充分利用 DFIG 风电机组自身发出无功的能力, 减少了 SVG 的配置容量。在 MATLAB/Simulink 软件仿真平台建立 DFIG 风电机组并网模型, 仿真结果证实了此控制策略能够完成连续无功补偿, 有效维持并网点电压稳定, 增强系统输电能力。

关键词: 双馈异步发电机; 静止无功发生器; 电力系统稳定器; 协调控制

中图分类号: TM 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)07-0116-06

Research on Voltage Stability Control Strategy for DFIG Wind Farm with SVG^{*}

ZOU Yun, WANG Weiqing, WANG Haiyun

(School of Electric Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: The reactive power compensation capability of doubly fed induction generator (DFIG) can not meet the demand of large-scale wind power grid. Although the introduction of fixed capacitors could provide reactive power compensation, as the system was affected by the power coupling, it could not effectively maintain real-time voltage stability. A control strategy that static var generator (SVG) and DFIG coordinated compensation reactive power was proposed, and the power system stabilizer (PSS) was introduced to suppress the low frequency oscillation of the system, make full use of DFIG wind turbine capacity itself to send reactive power, the configuration capacity of SVG was reduced. The DFIG wind turbine model is established on the MATLAB/Simulink software simulation platform, the simulation results showed that the control strategy could complete the continuous reactive power compensation, effectively maintain the voltage stability and enhance the transmission capacity of the system.

Key words: doubly fed induction generator (DFIG); static var generator (SVG); power system stabilizer (PSS); coordination control

0 引 言

风能的间歇性、随机性和波动性, 导致风电场的有功、无功输出通常处于波动不稳定的状态; 此外, 大规模风电并网将会造成电网并网点电压不稳定等问题。这都会严重影响电能质量, 降低输

电线路和发电设备的使用寿命, 对电力系统的安全稳定运行有较大的隐患^[1-3]。

近年来, 双馈型风力发电机由于其自身的多种优势而得到广泛应用。国内外许多学者对风电场无功补偿和无功补偿装置之间的协调控制策略做了大量研究^[4-10], 但多将无功补偿装置作为主

^{*} 基金项目: 新疆自治区重点实验室 (2016D03021); 国家自然科学基金项目 (51667020)

作者简介: 邹 赞 (1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源并网技术。

王维庆 (1959—), 男, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统微机保护、计算机工业控制、风力发电控制等。

王海云 (1973—), 女, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向为可再生能源发电与并网技术。

要补偿设备,忽视了风电机组自身的无功调节能力或没有充分利用风电机组自身的无功调节能力^[11-13]。文献[14]将研究重点放在风电机组的无功容量方面。文献[15]提出一种利用双馈异步发电机(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)的无功输出能力与本地有载调压器共同控制无功以达到电压稳定目的的控制策略,指出有载调压器能够扩大 DFIG 所发出无功的范围,进而提高系统的稳定性。文献[16]提出了一种仅由 DFIG 风电场提供无功调节的无功功率控制策略。上述研究中,关于各种无功调节设备的综合利用研究较少,仅考虑了在单个无功调节设备作用下控制策略的仿真验证。这类控制策略较多地使用了离散设备,一方面因风速波动而频繁调节,会增大调节成本和降低风电场的经济性;另一方面在调节这些设备时因受到时间间隔的限制而不能及时补偿,降低了系统的安全性。

为提高电力系统稳定性,电力系统稳定器(Power System Stabilizer, PSS)因其可以提高电力系统阻尼和抑制电力系统低频振荡,而被认为是抑制 DFIG 风电机组并网系统低频振荡的一种经济有效的方法^[17-19]。

针对上述问题,由于充分利用 DFIG 风电机组自身发出无功的能力,能够减少对 SVG 的投资,提高风电场的经济性,因此,本文首先在充分挖掘 DFIG 风电机组能够发生无功功率的能力的基础上,引入了静止无功发生器(Static Var Generator, SVG)^[20]来配合 DFIG 风电机组协调补偿系统无功,同时引入 PSS 抑制系统的低频振荡,进一步提高电网稳定性,保证电网安全。其次提出一种 DFIG 与 SVG 协调控制补偿无功功率的控制策略。最后在 MATLAB/Simulink 平台搭建了 DFIG 并网模型并对并网点 PCC 处的电压进行了仿真分析。仿真结果验证了所提方法的有效性。

1 DFIG 结构

双馈风电机组通常在转子侧变流器处配有 Crowbar 保护电路,为转子侧电路提供旁路,维持发电机不脱网运行^[21-23]。DFIG 定子绕组直接与电网相连,转子绕组通过脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)背靠背变流器与电网相连。典型含 Crowbar 保护电路的 DFIG 机组并网模型如

图 1 所示。

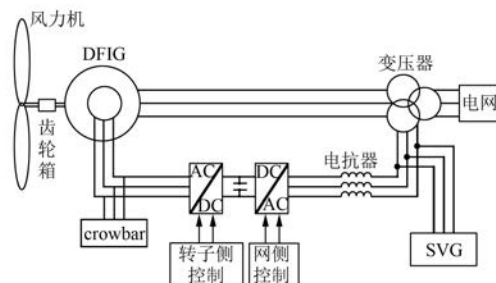


图 1 DFIG 机组并网模型

2 DFIG 的控制策略

2.1 转子侧变流器控制方式

DFIG 的转子侧变流器(Rotor Side Converter, RSC)采用双闭环控制。其控制框图如图 2 所示。

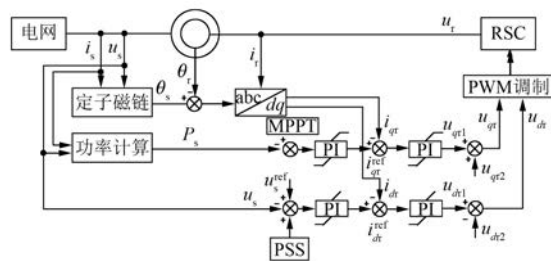


图 2 DFIG 的 RSC 控制框图

外环控制 DFIG 风电机发出的实际有功功率 P_s 和实际无功功率 Q_s 。内环控制电流参考值在 dq 坐标轴的分量 i_{qr}^{ref} 和 i_{dr}^{ref} 与实际电流值在 dq 坐标轴的分量 i_{qr} 和 i_{dr} 作比较,其差值经过 PI 控制器耦合成电压信号 U_{qr} 和 U_{dr} ,最后通过 PWM 调制。该控制方法加快了转子侧无功响应速度,增强了转子侧无功调节的灵活性。

在 RSC 控制中引入 PSS。PSS 的输出信号与 RSC 控制器的参考电压信号相连,通过控制 DFIG 转子侧产生的无功功率来降低系统的低频振荡。PSS 的通用传递函数为

$$U_{PSS} = K_{PSS} \left(\frac{ST_w}{1 + ST_w} \right) \left(\frac{1 + ST_1}{1 + ST_2} \right) \left(\frac{1 + ST_3}{1 + ST_4} \right) U_{in} \quad (1)$$

式中: U_{PSS} ——控制器的输出信号;

U_{in} ——控制器的输入信号;

K_{PSS} ——增益常数;

T_w ——时间常数;

T_1, T_2, T_3, T_4 ——补偿器的时间常数。

本文设定增益常数 K_{PSS} 为 120, 时间常数 $T_w = 10$, 补偿器的时间常数 $T_1 = T_3 = 0.1599, T_2 = T_4 = 0.1325$ 。

2.2 网侧变流器控制方式

DFIG 的网侧变流器 (Grid Side Converter, GSC) 也采用双闭环控制。其控制框图如图 3 所示。

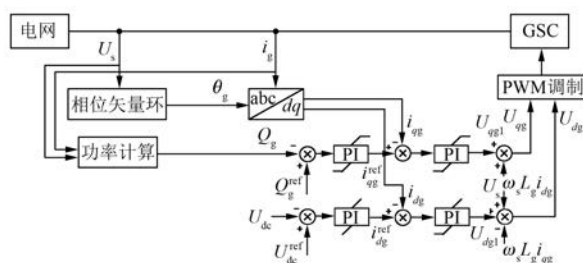


图3 DFIG 的 GSC 控制框图

GSC 外环控制变流器直流母线电压和 GSC 与电网之间的无功功率的实际值 Q_g 与无功功率的参考值 Q_g^{ref} 作比较, 其差值经过 PI 控制器生成电流在 q 轴的分量 i_{qg}^{ref} 。直流母线电压实际值 U_{dc} 与直流母线电压参考值 U_{dc}^{ref} 作比较, 其差值经过 PI 控制器生成电流在 d 轴的分量 i_{dg}^{ref} 。内环控制电流参考值在 dq 坐标轴的分量 i_{qg}^{ref} 和 i_{dg}^{ref} 与实际电流值在 dq 坐标轴的分量 i_{qg} 和 i_{dg} 作比较, 其差值经过 PI 控制器再耦合成电压信号 U_{qg} 和 U_{dg} 。最后通过 PWM 调制, 实现无功功率调节的作用。

2.3 SVG 控制方式

本文采用 SVG 的电流直接控制方式。其控制框图如图 4 所示。

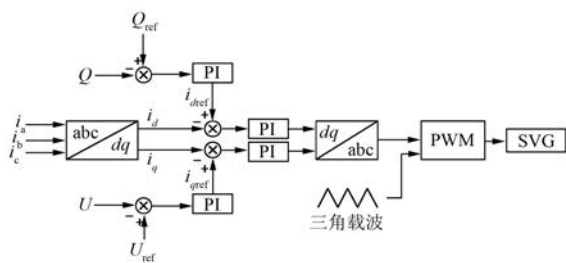


图4 SVG 控制框图

SVG 发出无功功率的参考值 Q_{ref} 与其发出无功功率的实际值 Q 作比较, 差值经过 PI 控制器整定为无功电流参考信号 $i_{d\text{ref}}$ 。 $i_{d\text{ref}}$ 与三相电流经 dq 变换在 d 轴的电流分量 i_d 作比较, 差值经过 PI 控制器整定为无功调节量 i_d^* 。 SVG 的电压参考值

U_{ref} 与实际电压 U 作比较, 差值经过 PI 控制器整定为无功电流参考信号 $i_{q\text{ref}}$ 。 $i_{q\text{ref}}$ 与三相电流经 dq 变换在 q 轴的电流分量 i_q 作比较, 差值经过 PI 控制器整定为有功调节量 i_q^* 。 将 i_d^* 和 i_q^* 作 dq 逆变换得到三相瞬时电流信号 i_a^*, i_b^*, i_c^* , 将得到的三相瞬时电流信号与三角波信号进行比较, 通过 PWM 调制, 实现与 DFIG 机组协调控制补偿无功功率。

2.4 DFIG 无功功率协调控制

当 DFIG 机组所发出的无功不足以满足系统的无功需求时, SVG 开始进入工作状态, 与 DFIG 机组共同补偿系统无功。 DFIG 机组与 SVG 无功功率协调控制策略如图 5 所示。

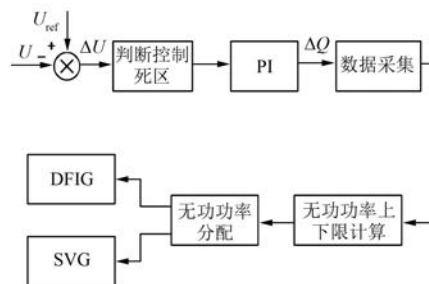


图5 DFIG 无功功率控制策略

U_{ref} 为并网点 PCC 的电压参考值, U 为并网点 PCC 电压实际值, ΔU 为并网点 PCC 处的电压偏差。 首先需要判断 ΔU , 看其是否在设定的死区范围, 只有当 ΔU 处于设定死区范围外, 控制系统才能运作, 可有效避免控制系统的频繁运行。

DFIG 机组的无功功率是由定子侧与网侧变流器产生的。 DFIG 定子侧发出的有功功率和无功功率在 dq 坐标系中可表示为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} U_s i_{sd} \\ Q_s = -\frac{3}{2} U_s i_{sq} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_s ——DFIG 定子侧发出的有功功率;

Q_s ——DFIG 定子侧发出的无功功率;

U_s ——定子侧电压的最大值;

i_{sd} ——定子侧电流在 d 轴上的分量;

i_{sq} ——定子侧电流在 q 轴上的分量。

转子侧电流分量 i_{rd} 和 i_{rq} 与定子侧输出的有功功率和无功功率的关系由式(3)表示:

$$\begin{cases} i_{rd} = \frac{2}{3} \frac{P_s L_s}{U_s L_m} \\ i_{rq} = -\frac{2}{3} \frac{Q_s L_s}{U_s L_m} - \frac{U_s}{\omega_1 L_m} \end{cases} \quad (3)$$

式中: L_s ——定子的自感;

L_m ——励磁电感;

ω_1 ——同步旋转的角速度。

转子侧电流关系由式(4)表示:

$$i_r^2 = i_{rd}^2 + i_{rq}^2 \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可得:

$$\left(\frac{2}{3} \frac{P_s L_s}{U_s L_m} \right)^2 + \left(-\frac{2}{3} \frac{Q_s L_s}{U_s L_m} - \frac{U_s}{\omega_1 L_m} \right)^2 = i_r^2 \leq i_{rmax}^2 \quad (5)$$

式中: i_{rmax} ——DFIG 风机转子侧变流器流过电流的最大值。

整理可得:

$$P_s^2 + \left(Q_s + \frac{3U_s^2}{2X_s} \right)^2 \leq \left(\frac{3X_m U_s i_{rmax}}{2X_s} \right)^2 \quad (6)$$

由式(6)可得 DFIG 风机定子侧的无功功率输出范围:

$$\begin{aligned} -\frac{3U_s^2}{2X_s} - \sqrt{\left(\frac{3X_m U_s i_{rmax}}{2X_s} \right)^2 - P_s^2} &\leq Q_s \leq \\ -\frac{3U_s^2}{2X_s} + \sqrt{\left(\frac{3X_m U_s i_{rmax}}{2X_s} \right)^2 - P_s^2} \end{aligned} \quad (7)$$

网侧变流器也可作为无功源向系统提供无功功率。其无功功率的发出能力为

$$Q_g^2 \leq S_g^2 - P_g^2 \quad (8)$$

式中: P_g ——网侧变流器的容量,忽略线路的损耗,则 $P_g = P_r$,由 DFIG 转子侧发出有功功率与定子侧发出有功功率的关系可知, $P_r = sP_s$;

s ——转差率。

整理式(8)可得 DFIG 风机网侧变流器发出无功功率的范围:

$$-\sqrt{S_g^2 - (sP_s)^2} \leq Q_g \leq \sqrt{S_g^2 - (sP_s)^2} \quad (9)$$

由式(7)和式(9)可得 DFIG 机组对系统提供无功功率的范围:

$$\begin{aligned} \left[-\sqrt{S_g^2 - (sP_s)^2} - \frac{3U_s^2}{2X_s} - \sqrt{\left(\frac{3X_m U_s i_{rmax}}{2X_s} \right)^2 - P_s^2}, \right. \\ \left. \sqrt{S_g^2 - (sP_s)^2} - \frac{3U_s^2}{2X_s} + \sqrt{\left(\frac{3X_m U_s i_{rmax}}{2X_s} \right)^2 - P_s^2} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

额定功率为 1.5 MW 的某 DFIG 无功调节范围如图 6 所示。

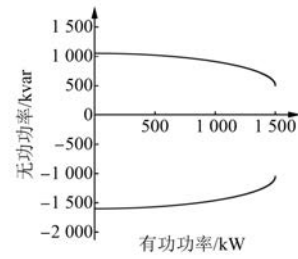


图 6 额定功率为 1.5 MW 的某 DFIG 无功调节范围

ΔU 经过 PI 控制器整定为无功输出 ΔQ , 然后由数据采集系统进行数据采集, 根据采集到的数据计算出 DFIG 风电机组的无功调节能力, 得到 DFIG 风电机组的无功功率参考值, 然后得出 DFIG 风电机组可调节无功功率的上下限。最后通过无功功率分配模块对系统所需无功进行分配, 优先分配给 DFIG 风电机组提供无功, 当所分配无功超出 DFIG 风电机组最大调节限度时, 超出无功分配给 SVG 进行补偿。

3 仿真分析

按照图 1 所示的 DFIG 模型在 MATLAB/Simulink 软件平台搭建仿真模型, 将 SVG 安置于 690 V/35 kV 变压器的高压侧, 将其补偿容量设定为 ± 12 Mvar, 经过 20 km 线路接入 110 kV 无穷大电网。本文将 33 台 DFIG 风电机等效为 1 组 DFIG, 每台 DFIG 的额定功率为 1.5 MW。

本文仿真设置风速曲线如图 7 所示, 对应系统并网点有功输出跟随风速波动曲线如图 8 所示。采用本文 DFIG 机组与 SVG 协调控制策略和采用传统恒功率控制时并网点母线电压变化如图 9 所示。

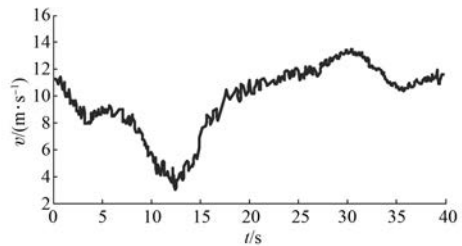


图 7 风速曲线

由仿真结果可见, 当风速高于 11.5 m/s 时, DFIG 机组发出的无功功率稳定为 48.8 MW, 接近

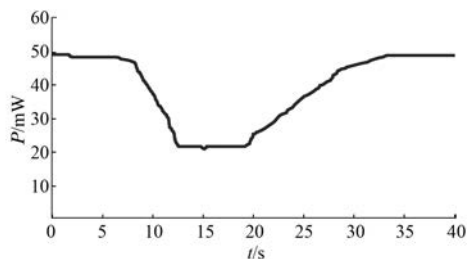


图8 并网点有功输出

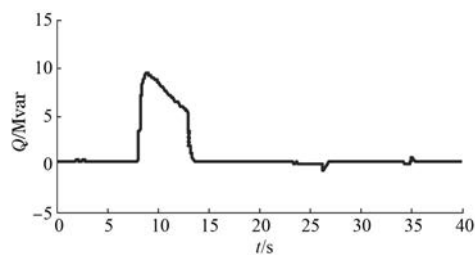


图11 SVG发出无功功率

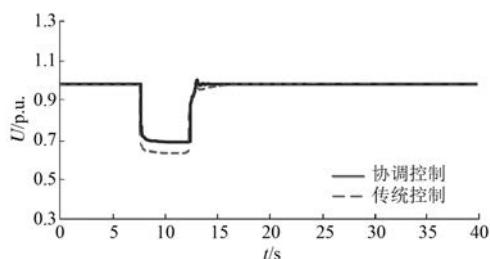


图9 并网点母线电压

机组额定功率;当风速降低时,DFIG 机组发出无功也随着减少。当 DFIG 机组发出无功功率逐渐减少,系统需要吸收的无功功率将大于系统发出的无功功率,这会直接导致并网点电压的跌落。在 8~13 s 期间,由于风速的降低,系统有功输出减少,并网点电压跌落到 0.7 p.u.以下,DFIG 机组需要从系统吸收大量无功,当采用恒功率因控制时,并网点电压跌落较深,跌落至 0.628 p.u.左右,并网点电压在 16 s 时恢复到 1 p.u.,采用本文控制策略,并网点电压跌落至 0.698 p.u.左右,并网点电压在 14 s 时恢复到 1 p.u.。可见采用本文控制策略,在风速发生变化期间,并网点电压跌落不至于太深且电压更快恢复到稳定值。

采用本文控制策略,DFIG 发出的无功功率如图 10 所示,SVG 发出的无功功率如图 11 所示。

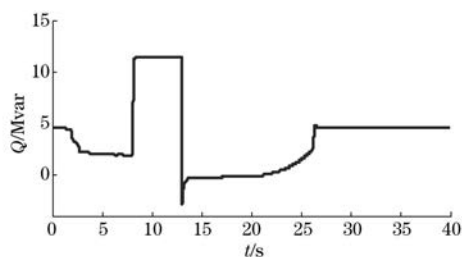


图10 DFIG发出无功功率

由仿真结果可见,在 0~8 s 和 13~40 s 期间,系统主要由 DFIG 机组自身发出无功功率,SVG

处于待工作状态。在 8~13 s 期间,并网点电压跌落较深,DFIG 机组所发出的无功不足以满足系统的无功需求,此时 SVG 开始工作,与 DFIG 机组共同补偿系统无功,并网点电压恢复稳定。

4 结 语

本文结合使用 SVG 对 DFIG 风电场进行无功补偿,充分发挥 DFIG 机组自身发出无功的能力,提出 DFIG 机组与 SVG 协调补偿系统无功的控制策略,并引入 PSS 抑制系统低频振荡,进一步抑制系统电压波动。

仿真结果表明:该策略充分利用了 DFIG 风电机组发出无功的能力,减少了 SVG 的配置容量,同时避免了 SVG 频繁操作,延长了 SVG 的使用寿命,从而降低了对 SVG 的投资,进而提高了风电场的经济性。在并网点母线电压跌落期间,所提控制策略能使母线电压不至于跌落太低,且能够使母线电压更快恢复,增强了系统的稳定性。

【参考文献】

- [1] 白鸿斌,王瑞红.风电场并网对电网电能质量的影响分析[J].电力系统及其自动化学报,2012,24(1): 120-124.
- [2] 林永,劳伟筹.风电场对电网的电能质量影响研究[J].电气应用,2009,28(21): 42-45.
- [3] 高玉洁.风电场接入电网后的电能质量问题分析[J].南方电网技术,2009,3(4): 68-72.
- [4] 殷桂梁,马会艳,陈学琴.电网电压波动时双馈电机的无功补偿特性分析[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(4): 84-88.
- [5] 胡庆林,杨培宏,付盼,等.风特性及尾流效应对双馈感应电机低电压穿越能力的影响[J].电机与控制应用,2017,44(1): 89-96.
- [6] 边晓燕,田春笋,符杨.严重故障下 DFIG 风电场低

- 电压穿越改进控制研究[J].电机与控制应用, 2016, 43(6): 69-73.
- [7] 周明, 葛江北, 郭飞, 等. 改善连锁脱网的风电场群电压无功紧急控制策略[J].电力系统自动化, 2016(5): 71-77.
- [8] 陈鹏伟, 肖湘宁, 杨洋, 等. 含 STATCOM 的双馈风电场无功协调补偿策略[J].现代电力, 2016, 33(1): 8-13.
- [9] 姚霞, 刘建华, 陈斌, 等. 低压 TSC 无功补偿装置投切策略优化设计[J].电力电容器与无功补偿, 2016, 37(6): 144-149.
- [10] 李静, 戴文战, 韦巍. 基于混合整数凸规划的含风力发电机组配电网无功补偿优化配置[J].电工技术学报, 2016, 31(3): 121-129.
- [11] 贾俊川, 刘晋, 张一工. 双馈风力发电系统的新型无功优化控制策略[J].中国电机工程学报, 2010, 30(30): 87-92.
- [12] 万航羽, 黄梅. 双馈风力发电机建模及谐波分析[J].电机电器, 2008, 27(6): 53-57.
- [13] 何健, 丁晓群, 陈光宇, 等. 基于 DFIG 与 SVC 的风电场无功电压协调控制策略[J].电力建设, 2015, 36(5): 1-6.
- [14] 高磊, 朱方, 赵红光, 等. 东北—华北直流互联后东北电网发电机组 PSS 参数适用性研究[J].中国电机工程学报, 2009, 29(25): 19-25.
- [15] 牛振勇, 杜正春, 方万良, 等. 基于进化策略的多机系统 PSS 参数优化[J].中国电机工程学报, 2004, 24(2): 22-27.
- [16] 管秀鹏, 程林, 孙元章, 等. 基于 Prony 方法的大型互联电网 PSS 参数优化设计[J].电力系统自动化, 2006, 30(12): 7-11.
- [17] 姜惠兰, 姜哲, 李天鹏, 等. 风机转子撬棒投切对电力系统暂态稳定性的影响[J].电网技术, 2016, 40(8): 2383-2388.
- [18] 黄涛, 陆于平. 投撬棒后双馈风机暂态电势的变化特性分析[J].电网技术, 2014, 38(10): 2759-2765.
- [19] 张曼, 姜惠兰. 基于撬棒并联动态电阻的自适应双馈风力发电机低电压穿越[J].电工技术学报, 2014, 29(2): 271-278.
- [20] 张海鹏, 林舜江, 刘明波, 等. 低压配电网无功补偿及效益评估系统的开发和应用[J].电力系统保护与控制, 2016(4): 129-136.
- [21] 程苗苗, 刘万辉, 冯凯. 一种新型静止无功补偿器的研究[J].电力电子技术, 2016, 50(1): 56-58.
- [22] 刘晓军, 杨冬锋, 高磊. 一类多静止无功补偿器阻尼控制器间的交互影响机理[J].电网技术, 2016, 40(2): 534-540.
- [23] 黄占勇. 电力系统静止无功补偿技术的现状及发展[J].科技视界, 2016(1): 117.

收稿日期: 2017 -11 -06

(上接第 92 页)

【参考文献】

- [1] 李海国, 常越, 王达开, 等. 变频器输出有功功率测量方法研究[J].电机与控制应用, 2017, 44(4): 107-111.
- [2] 王亚康. 功率算法发展与介绍[J].机电工程技术, 2016(增刊 2): 14-19.
- [3] ORFANIDIS S J. Signal Processing[M].北京:清华大学出版社, 2010.
- [4] 钟晓剑. 模块化三相四线制并联型有源电力滤波器数字控制及实现[D].杭州:浙江大学, 2014.
- [5] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制[M].北京:电子工业出版社, 2011.
- [6] RODRIGUEZ P, TEODORESCU R, CANDELA I, et al. New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions [C] // Power Electronics Specialists Conference, 2006 PESC'06 37th IEEE, 2006: 1-7.
- [7] 瞿婷婷, 周静, 卫佳骏, 等. 基于 Simulink/S-Function 模块的数据采集板卡硬件驱动开发[J].自动化技术与应用, 2016, 35(5): 41-45.

收稿日期: 2018 -01 -03

引领技术发展趋势

报道经典实用案例

追踪行业最新动态