# Journal of System Simulation

Volume 32 | Issue 2

Article 17

2-19-2020

# Control Improvement and Simulation of DFIG under Power Grid Failure

Hongyang Zhang 1. SINOPEC Fushun Research Institute of Petroleum and Petrochemicals, Fushun 113001, China;;

Zhentang Shi 1. SINOPEC Fushun Research Institute of Petroleum and Petrochemicals, Fushun 113001, China;;

Zhifeng Zhang 2. Shenyang University of Technology, College of Electrical Engineering, Shenyang 110023, China;

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

# Control Improvement and Simulation of DFIG under Power Grid Failure

#### Abstract

Abstract: Following the increasing scale of installed wind power, the wind turbines, as an important part of the future energy internet, its ability to cope with the fault of the power grid becomes more and more important. *Aiming at the transient characteristics of doubly fed induction generator (DFIG) under power grid fault, a comprehensive control strategy, based on the classification of power grid faults, the optimization of controller parameters and auxiliary equipments, is proposed.* Compared with the traditional control method, the large control error and response lag is overcome, and the fine control is realized. Based on MATLAB and VC++ combined modeling MEX technology, a doubly fed wind power generation system model under grid fault is built. Simulation results verify the effectiveness of the proposed integrated control strategy.

#### Keywords

Power grid fault, doubly fed wind generator, transient characteristics, integrated control

## **Recommended Citation**

Zhang Hongyang, Shi Zhentang, Zhang Zhifeng. Control Improvement and Simulation of DFIG under Power Grid Failure[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(2): 299-305.

第 32 卷第 2 期	系统仿真学报©	Vol. 32 No. 2
2020年2月	Journal of System Simulation	Feb., 2020

# 电网故障下双馈风力发电机控制改进与仿真

张洪阳1,时振堂1,张志锋2

(1. 中国石化抚顺石油化工研究院, 辽宁 抚顺 113001; 2. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110023)

**摘要:**随着风电装机规模的不断增加,作为未来能源互联网中重要的一环,风电机组应对电网故障 的能力越加显得重要。针对双馈风力发电机组在电网故障下的暂态特性,提出了一种基于电网故障 类型区分、控制器设计和辅助设备穿越的综合控制策略。相比于传统的控制方法,克服了控制误差 大和响应滞后的问题,真正实现了系统的精细化控制。基于 MATLAB 和 VC++联合建模,利用 MEX 技术搭建了电网故障下的 1.5 MW 双馈风力发电系统模型,仿真结果验证了所提出的综合控制策略 在电网故障下提高双馈风力发电机控制的有效性。

关键词: 电网故障; 双馈风力发电机; 暂态特性; 综合控制
中图分类号: TM315 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 02-0299-07
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0129

#### Control Improvement and Simulation of DFIG under Power Grid Failure

Zhang Hongyang<sup>1</sup>, Shi Zhentang<sup>1</sup>, Zhang Zhifeng<sup>2</sup>

(1. SINOPEC Fushun Research Institute of Petroleum and Petrochemicals, Fushun 113001, China;
 2. Shenyang University of Technology, College of Electrical Engineering, Shenyang 110023, China)

**Abstract:** Following the increasing scale of installed wind power, the wind turbines, as an important part of the future energy internet, its ability to cope with the fault of the power grid becomes more and more important. *Aiming at the transient characteristics of doubly fed induction generator (DFIG) under power grid fault, a comprehensive control strategy, based on the classification of power grid faults, the optimization of controller parameters and auxiliary equipments, is proposed.* Compared with the traditional control method, the large control error and response lag is overcome, and the fine control is realized. Based on MATLAB and VC++ combined modeling MEX technology, a doubly fed wind power generation system model under grid fault is built. Simulation results verify the effectiveness of the proposed integrated control strategy.

Keywords: Power grid fault; doubly fed wind generator; transient characteristics; integrated control

# 引言

随着风电装机规模的不断增大,其发电容量占 据电网中的比例也越来越大,而作为未来能源互联

> 收稿日期: 2018-03-05 修回日期: 2018-11-05; 基金项目:国家自然科学基金(61603263),中国石化

集团公司资助项目(317018); 作者简介:张洪阳(1982-),男,辽宁大连,博士,工 程师,研究方向为新能源发电技术、电力电子技术在 电力系统中的应用。 网中最重要的环节之一,如何应对电网故障等一些 非理想条件,实现风电机组安全、稳定运行是至关 重要的,当前研究主要集中在围绕电网电压骤降/ 骤升,不平衡运行等方面<sup>[1-3]</sup>。

针对双馈风力发电机在电网故障下的研究,文 献[4]利用 1/4 周期延时方法对正负序分量进行分 离,以消除二倍频谐波分量为控制目标,并在 MATLAB/ Simulink 软件上建立了仿真系统,实现

第 32 卷第 2 期	系统仿真学报	Vol. 32 No. 2
2020年2月	Journal of System Simulation	Feb., 2020

了不平衡电压下正负序电流双闭环控制,但是缺少 对发电机侧的控制考虑; 文献[5]利用比例-积分-谐振(PIR)控制对双馈发电机定子暂态电压进行前 馈补偿,不平衡情况下注入 60 Hz/120 Hz 的转子 电流分量,从而减小转矩脉动; 文献[6]则从并网 的角度出发,对系统稳定性和参数进行了设计,对 电网电压不平衡影响精度的问题,利用二阶解耦复 数滤波对采样电压进行处理,并设计了滤波器参 数; 文献[7]采用谐振控制技术提升双馈风电机组 应对电网电压故障的办法,重点分析了数字控制延 时影响及相位补偿,以及比例-谐振控制器(PR)的 离散化问题;针对网侧变流器的控制改进,文献[8] 中采用外环模糊 PID 控制内环采用 PR 控制,同时 控制正、负序分量进而消除电网电压不平衡时的直 流侧二次谐波; 撬棒电路投入、频率变化下和弱电 网下的双馈发电机组的特性和分析在文献[9-11]中 进行了研究,但是缺乏全面的系统阐述。在系统仿 真研究方面, 文献[12]基于 PSCAD 仿真实现了双 馈风机的柔性并网、稳态以及暂态情况的功率独立 稳定控制; 而采用基于磁链幅值相角控制, 通过在 线训练 Elman 神经网络以实现自适应控制的方法 则在文献[13]中进行了介绍; 电网电压不对称跌落 下双馈风电机组转子电压分析则在文献[14]中进 行了介绍。以上研究忽略了两个问题:(1) 电网故 障类型不同处理机制也各不相同,不能一概而论, 特别地,在电网严重故障下需要增加硬件系统实现 故障穿越,并且控制算法的改进应该结合增加的硬 件系统完成协调控制;(2)仿真方法上缺乏多种仿 真手段的结合,以及缺乏仿真技术与工程技术结合 的阐述和研究。

针对以上问题,本文通过双馈风力发电机组在 电网故障下的暂态特性分析,提出了一种基于电网 故障类型区分、控制器设计和辅助设备穿越的综合 控制策略,基于 MATLAB 和 VC++联合建模,利 用 MEX 技术搭建了电网故障下的双馈风力发电系 统模型。仿真研究表明所提出的综合控制策略在电 网故障下提高双馈风力发电机控制的有效性。相比 于传统的控制方法,克服了控制误差大和响应滞后 的问题,实现了系统的精细化控制。

## 1 双馈发电机数学模型

#### 1.1 电网正常下数学模型

建立双馈发电机的数学模型,做如下假设:定 子绕组按照发电机惯例;转子绕组按照电动机惯 例;忽略空间谐波和磁路的非线性饱和影响等。基 于 dq 轴同步旋转坐标变换,以双馈发电机的定/ 转子磁链为状态变量,定/转子电流/电压为输入量, 得到 dq 轴同步旋转坐标系下的状态方程表述如式 (1)和(2)所示:

$$\begin{cases} u_{ds} = -R_{s}i_{ds} - \omega_{l}\psi_{qs} + \frac{d}{dt}\psi_{ds} \\ u_{qs} = -R_{s}i_{qs} + \omega_{l}\psi_{ds} + \frac{d}{dt}\psi_{qs} \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_{dr} = -R_{r}i_{dr} - (\omega_{l} - \omega_{r})\psi_{qr} + \frac{d}{dt}\psi_{dr} \end{cases}$$
(1)

$$\begin{cases} u^{\text{d}} = -R_{\text{r}}i_{\text{qr}} + (\omega_{\text{l}} - \omega_{\text{r}})\psi_{\text{dr}} + \frac{d}{dt}\psi_{\text{qr}} \end{cases}$$
(2)

式中:  $u_{ds}$ ,  $u_{qs}$ ,  $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$ ,  $\psi_{ds}$ ,  $\psi_{qs}$ 为定子电压、 电流、磁链 dq 轴分量;  $u_{dr}$ ,  $u_{qr}$ ,  $i_{dr}$ ,  $i_{qr}$ ,  $\psi_{dr}$ ,  $\psi_{qr}$ 为转子电压、电流、磁链 dq 轴分量;  $\omega_{l}$ 为同 步角速度;  $\omega_{r}$ 为转子旋转角速度;  $\frac{d}{dt}$ 为微分因子;

具中
$$\psi_{ds}$$
、 $\psi_{qs}$ 、 $\psi_{dr}$ 、 $\psi_{qr}$ 如式(3)所示:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = -L_{s}i_{ds} + L_{m}i_{dr} \\ \psi_{qs} = -L_{s}i_{qs} + L_{m}i_{qr} \\ \psi_{dr} = -L_{m}i_{ds} + L_{r}i_{dr} \\ \psi_{qr} = -L_{m}i_{qs} + L_{r}i_{qr} \end{cases}$$
(3)

式中:  $L_s$ 为定子自感;  $L_m$ 为互感;  $L_r$ 为转子自感。 当采用定子磁链定向控制时,令d轴与定子磁链矢 量 $\psi_s$ 重合,则 $\psi_{ds} = \psi_s$ , $\psi_{qs} = 0$ ;根据磁链矢量 $\psi_s$ 和电压矢量 $u_s$ 的相位关系,得到 $u_{ds} = 0$ ,  $u_{qs} = u_s = \omega_l \psi_s$ ,将以上经过矢量定向后的条件带入 代入式(1)~(3),可以得到解耦的电流控制方程,如 式(4)所示:

$$\begin{cases} i_{dr} = \frac{L_{s}}{L_{m}} i_{ds} + \frac{\psi_{s}}{L_{m}} \\ i_{qr} = \frac{L_{s}}{L_{m}} i_{qs} \end{cases}$$
(4)

根据(1)~(4)得到双馈发电机转子电压控制方 程如式(5)所示:

$$\begin{cases}
u_{dr} = R_{r}i_{dr} - \omega_{slip}\sigma L_{r}i_{dr} + \\
\sigma L_{r}\frac{di_{dr}}{dt} - \frac{L_{m}}{L_{s}}(u_{ds} - R_{s}i_{ds}) \\
u_{qr} = R_{r}i_{qr} + \omega_{slip}[\sigma L_{r}i_{dr} + \\
\frac{L_{m}}{L_{s}}\psi_{s}] - \frac{L_{m}}{L_{s}}(u_{ds} - R_{s}i_{ds} - \omega_{l}\psi_{s})
\end{cases}$$
(5)

式中:漏磁系数 $\sigma = 1 - L_m^2 / L_r / L_s$ ,转差电角速度  $\omega_{slip} = \omega_l - \omega_r$ 。

#### 1.2 电网故障下数学模型

以三相电网电压短路为例,说明电网骤降下双 馈发电机的暂态特性变化和对控制系统安全性的 要求。在电网电压跌落时,由于不对称跌落后定子 磁链中负序分量的耦合,转子电压比三相对称跌落 时更大<sup>[14]</sup>,当三相电网电压跌落到0时,

转子电压 | *u*<sub>r</sub> | 如式(6)所示:

$$\left|u_{\rm r}\right|_{0\,\rm max} \approx \frac{L_{\rm m}}{L_{\rm s}} (1-{\rm s})u_{\rm s} \tag{6}$$

对于不对称跌落,当二相电网电压跌落到 0 时,转子电压如式(7)所示:

$$|u_{\rm r}|_{0\,\rm max} \approx \frac{L_{\rm m}}{L_{\rm s}} [(|{\rm s}| + 2(1-{\rm s}))u_{\rm s}]$$
 (7)

而在电网电压恢复时,对称跌落和不对称跌落 下转子电压具有相同的特性。同时也可知电网电压 骤升时类似与骤降,亦如以上分析过程,转子侧也 存在较大的高电压。

设电机转子等效感抗为 $X_{r\sigma}$ ,则可以得到转子最大电流 $|i_r|_{0max}$ 如式(8)所示:

$$|\dot{i}_{\rm r}|_{0\,\rm max} = \frac{|u_{\rm r}|_{0\,\rm max}}{\sqrt{R_{\rm r}^2 + X_{\rm r\sigma}^2}}$$
 (8)

可见,电网故障时较高的转子电压/电流是绕 组绝缘击穿和变流器功率器件损坏的根本原因,必 须需要有效抑制。

## 2 综合控制策略

#### 2.1 故障区分和控制器设计

根据风电并网要求,不同电网故障下,需要风 电机组在实现故障穿越的同时,还要对电网提供支 撑<sup>[1]</sup>。电网电压故障区分采用有效值和瞬时值相结 合的方法,按照正常运行、电网电压不平衡、电网 电压骤升/骤/骤降来区分。电网故障下数据的获取 采用 IIR 滤波器对于电网电压采样数据进行处理, 并通过 MATLAB 的 fdatool 工具箱实现 IIR 滤波器 的方便设计。在获得准确的电网电压采样信号之 后,实现电压有效值的计算;瞬时值的计算则依据 dq0 变换实现,由于该方面文献介绍较多,此处不 再赘述。

如 1.1 节所述,当采用定子磁链定向的矢量控制时所需要的功率控制器和电流控制器采用比例积分 PI 控制器;而如 1.2 节所述,当电网故障后,出现的直流分量、二倍频分量或负序分量如果还采用传统的控制器将不能满足控制性能要求,此时需要引入谐振 R 控制器。控制器的选择需要以准确的电网故障类型为区分,基本原则和约束为: (1)电网正常情况下,采用 PI 控制器,实现功率解耦;(2)电网电压骤降/骤升,一般过渡时间短,控制器切换亦不能较快相应,可以依旧采用 PI 控制器;(3)电网电压出现不平衡时,传统的 PI 控制器无法提供足够的幅值和相位增益处理二倍频的交流分量,而又由于该作用时间一般较长,因而可以采用谐振控制。

### 2.2 辅助泄放电阻配置

由于双馈发电机变流器设计容量有限,在电网 严重故障下,仅靠软件改进难以实现故障穿越,因 此需要增加辅助泄放电阻。通过不同的设计阈值来 控制电机转子侧的 Crowbar 和变流器直流母线侧 的 Chopper,进而配合 2.1 所述方法实现故障穿越。 其中,泄放电阻 *R*c的确定应该遵循的准则:(1) 阻 值选取应足以抑制转子侧的过电流;(2) 阻值选取 应避免直流侧过压;(3) 功率(电阻吸收的焦耳热)

第 32 卷第 2 期	系统仿真学报	Vol. 32 No. 2
2020年2月	Journal of System Simulation	Feb., 2020

满足散热要求。则泄放电阻 Rc要求如式(9)所示:

$$\frac{u_{\rm dcmax}}{I_{\rm cmax}} > R_{\rm c} > \sqrt{\left(\frac{|u_{\rm r}|_{0\,\rm max}}{I_{\rm cmax}}\right)^2 - X_{\rm r\sigma}^2} - R_{\rm r}$$
(9)

式中: *I*<sub>cmax</sub> 为允许的瞬间最大电流; *u*<sub>dcmax</sub> 为直流 母线电压允许的最大值。

#### 2.3 综合控制策略实施

结合电网故障类型区分、控制器设计和辅助设备穿越的综合控制策略如图 1 所示,其中, $i_{dr}^{*}$ 为无功电流分量, $i_{qr}^{*}$ 为有功电流分量, $i_{dr}$ 为 d 轴电流实际值, $i_{qr}$ 为有 如电流实际值, $-R_r i_{dr} + \omega_{slip} \sigma L_r i_{dr}$ 是 d 轴电压补偿项,而 q 轴电压补偿项为  $-R_r i_{qr} + \omega_{slip} [\sigma L_r i_{dr} - L_m \psi_s / L_s]$ ,以上共同组成了控制改进后的电流控制器。



控制器(PI/PIR)的选择根据电网故障类型判断 选择器实现。其中采用的谐振调节器,传递函数表 达式如式(10)所示:

$$G(s) = K_{\rm p} + K_{\rm i} \frac{1}{s} + K_{\rm r} \frac{2Q_{\rm c}s}{s^2 + 2Q_{\rm c}s + \omega_{\rm c}^2}$$
(10)

式中: K<sub>p</sub>, K<sub>i</sub>, K<sub>r</sub>分别是比例、积分、谐振系数, Q<sub>c</sub>为品质因数; ω<sub>c</sub>为截止频率。将式(8)利用 MATLAB 的 c2d()函数进行离散化后得到相关系 数。故障类型判断如图2所示,根据电网电压有效 值计算值和设定阈值比较,以及 dq0 瞬时值计算值 和设定阈值比较实现,二者综合之后判断出电网电 压骤降/骤升故障;再根据不平衡度公式(11)所示判 断出不平衡度。

$$\varepsilon = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \tag{11}$$

式中: U<sub>2</sub> 为三相电压负序分量方均根值; U<sub>1</sub> 为三 相电压正序分量方均根值。



图 2 故障类型判断 Fig. 2 Judgment of fault type

# 3 仿真模型和分析

#### 3.1 仿真模型

基于 MATLAB 和 VC++联合建模的 MEX 技术 搭建了电网故障下的双馈风力发电系统模型,进行 控制策略的仿真验证。仿真主要步骤如下:基于 MATLAB/Simulink 搭建控制系统框架,在 MATLAB 中配置\*.cpp 编译器,编写\*.cpp 代码实现控制算法, 编译\*.cpp 代码生成可执行的 MEX 文件,调用即可。 \*.cpp 该代码按照 C 语言标准编写,可以直接移植 到 DSP 控制器中,实现了仿真技术和工程技术的有 效应用。双馈发电机仿真参数如表 1 所示。

表1 双馈发电机仿真参数

Tab. 1 Parameters of DFIG simulation	
参数	数值
双馈发电机功率/kW	1500
额定电压/V	690
额定频率/Hz	50
额定转速/(r/min)	1800
转差范围	-0.2~+0.2
极对数	2

### 3.2 仿真分析

#### 3.2.1 空载并网控制

根据文中涉及的控制改进策略,以下进行了仿 真分析。首选分析了空载并网的定转子电流暂态波 形。设定系统在 0.1 s 时刻并网开关动作,发电机转 速设定为 1 200 r/min,转差率 s = 0.2,则得到空载 并网转子电流如图 3 所示,图中 a 是转子 a 相电流, b 是转子 b 相电流,c 是转子 c 相电流。空载并网定 第 32 卷第 2 期 2020 年 2 月

张洪阳,等:电网故障下双馈风力发电机控制改进与仿真

子电流如图 4 所示,图中 A 是定子 A 相电流, B 是 定子 B 相电流, C 是定子 C 相电流。可以看到并网 时刻起的 0.15 s 内定转子电流都出现了较大震荡, 转子电流正弦度很差,定子电流峰值接近 400A,不 过在变流器控制下定转子电流很快就恢复了稳定。





#### 3.2.2 加载控制

进行突加负载测试,在 0.5 s 时刻直接给定系 统功率 1 500 kW,发电机转速设定为额定转速的 1 800 r/min,转差率 s= -0.2,则得到转子和定子 电流如图 5~6 所示,图 5 中 *a* 是转子 *a* 相电流,*b* 是转子 *b* 相电流,*c* 是转子 *c* 相电流;图 6 中 A 是 定子 A 相电流,B 是定子 B 相电流,C 是定子 C 相电流。定子有功和无功功率如图 7 所示,图中 *P*s 是有功功率,*Q*s 是无功功率。可以看出,系统 能够快速地实现从 0 到满载 1 500 kW 的运行,并 且定转子电流都未出现任何较大的震荡。且图 7 中由于是计算发电机定子功率,而此时发电机处 于满载,转子馈电到电网转差功率,因此定子有 功功率为 1 250 kW。





#### 3.2.3 不平衡下控制

不平衡下,系统根据不平衡判断条件确认后, 实现电流调节器切换。为了能够清楚看到暂态过程, 重置仿真条件:仿真设定C相为90%跌落;其中不 平衡电网电压如图8所示,图中A是电网A相电压, B是电网B相电压,C是电网C相电压。调节器不 切换时的转子电流如图9所示,切换后的转子电流 如图10所示,图9~10中a是转子a相电流,b是 转子b相电流,c是转子c相电流。采用常规控制 时,因为存在二倍频谐波分量而出现低频振荡,采 用改进的控制后很好地解决了电网电压不平衡控制 问题,避免了因为谐波分量过大造成的变流器过流。





Fig. 10 Currents of control improved rotor

#### 3.2.4 电压骤降/骤升穿越控制

电网故障的另一个主要因素就是电压骤降/骤 升,而同时也会伴随电网电压不平衡的情况,因为 系统控制上面以是否触发电压骤降/骤升设定阈值 为判断条件,即如果控制器切换前后都不能解决过 流和过压,为了保护变流器安全和转子绝缘等,则 需要利用辅助泄放电阻实现,通过直流侧的 Chopper 和交流侧的 Crowbar 电阻实现暂态能量平 衡。为了能够清楚看到暂态过程,重置仿真条件: 设在系统在 0.5 s发生电压跌落,0.8 s进行恢复, 如图 11 所示,图中 A 是电网 A 相电压,B 是电网 B 相电压,C 是电网 C 相电压。设定电网电压骤降 时三相对称跌落到 20%,得到的转子电流如图 12 所示,图中 a 是转子 a 相电流, b 是转子 b 相电流, c 是转子 c 相电流。可以看到在在电网电压发生跌 落后的 5 ms 左右判断出是低电压跌落发生,且发 生了过流的条件 Crowbar 即刻动作,在泄放电阻投 入 60 ms 后切除,系统进入无功支持状态,在电网 电压恢复后,由于过电流的再次出现,泄放电阻再 次投入 40 ms 后切除,最终实现了低电压穿越过程。



# 4 结论

本文基于电网故障类型区分、控制器设计和辅助设备穿越的综合控制策略,并且通过基于 MATLAB和VC++联合建模,利用MEX技术搭建 了电网故障下的双馈风力发电系统模型。通过实例 仿真分析表明:所提出的综合控制策略在电网故障 下提高双馈风力发电机控制的有效性,本方法克服 了传统控制方法的控制误差大和响应滞后的问题, 实现了双馈风力发电机系统的的精细化控制。

### 参考文献:

 [1] 年珩,程鹏,贺益康,等.故障电网下双馈风电系统运 行技术研究综述[J].中国电机工程学报,2015,35(16): 4184-4197.

第 32 卷第 2 期		Vol. 32 No. 2
2020年2月	张洪阳, 等: 电网故障下双馈风力发电机控制改进与仿真	Feb., 2020

Nian Heng, Cheng Peng, He Yikang, et al. Review on operation techniques for DFIG-based wind energy conversion systems under network faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4184-4197.

 [2] 胡书举,孟岩峰,龚文明,等.非理想电网条件下双馈 式风电机组的运行控制策略[J].电工技术学报,2013, 28(5):99-104.

Hu Shuju, Meng Yanfeng, Gong Wenming, et al. Operation control strategy of DFIG wind turbine under non-ideal grid conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 99-104.

- [3] Hua Geng, Cong Liu, Geng Yang, et al. LVRT capability of DFIG-Based WECS under asymmetrical grid fault condition[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2013, 60(6): 2495-2509.
- [4] 雷为民, 苗友忠, 罗玮, 等. 电网电压不平衡情况下双 馈风力发电变流器控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2017, 39(6): 612-616.

Lei Weimin, Miao Youzhong, Luowei, et al. Control of doubly-fed wind power generation converter under unbalanced grid voltage[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2017, 39(6): 612-616.

- [5] Liang J Q, Howard D F, Restrepo J A, et al. Feed forward transient compensation control for DFIG wind turbine during both balanced and unbalanced grid disturbances[J].
   IEEE Transactions on Industry Applications (S0093-9994), 2013, 49(3): 1452-1463.
- [6] 王德玉,刘文钊,郭小强,等.非理想电网电压情况下 并网变换器高阶解耦复数滤波并网同步技术[J].中国 电机工程学报,2015,35(10):2576-2583.

Wang Deyu, Liu Wenzhao, Guo Xiaoqiang, et al. Grid synchronization technique with high-order decoupled complex filters for grid-connected converters under non-ideal grid voltages[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2576-2583.

- [7] 贺益康, 徐海亮. 双馈风电机组电网适应性问题及其 谐振控制解决方案[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5188-5203.
  He Yikang, Xu Hailiang. The grid adaptability problem of DFIG-based wind turbines and its solution by resonant control scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2014,
- [8] 程启明, 郭凯, 程尹曼, 等. 电网电压不平衡时 DFIG 网侧变流器新型双环控制策略[J]. 电机控制与应用, 2015, 42(12): 35-42.

Cheng Qiming, Guo Kai, Cheng Yiman, et al. New double-loop control strategy for DFIG grid-side converter under unbalanced grid voltage[J]. Electric Machines & Control Application, 2015, 42(12): 35-42.

- [9] 姜惠兰, 李天鹏, 薛静玮, 等. 撬棒投入对双馈风机电 磁功率暂态特性影响[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28 (12): 7-12.
  Jiang Huilan, Li Tianpeng, Xue Jingwei, et al. Impact of crowbar on the transient characteristic of DFIG electromagnetic power[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,
- [10] 杨俊友,陈韶宇,王海鑫,等. 电网频率变化下双馈风 力发电机组暂态特性分析[J].太阳能学报,2015,36(4): 798-805.

2016, 28(12): 7-12.

Yang Junyou, Chen Shaoyu, Wang Haixin, et al. Transient characteristic analysis of DFIG during grid frequency change[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2015, 36(4): 798-805.

- [11] 张学广, 马彦, 王天一, 等. 弱电网下双馈发电机输入 导纳建模及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1507-1515.
  Zhang Xueguang, Ma Yan, Wang Tianyi, et al. Input admittance m modeling and stability analysis of DFIG under weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1507-1515.
- [12] 郑景文,秦亮,刘开培,等.双馈式风力发电机运行与 控制的数字仿真研究[J]. 微特电机, 2016, 44(1): 27-33.
  Zheng Jingwen, Qin Liang, Liu Kaipei, et al. Research on digital simulation of running and controlling of doubly-fed wind power generation system[J]. Journal of System Simulation, 2016, 44(1): 27-33.
- [13] 牛玉广,杨巍,李晓明,等. 双馈风机神经电力系统稳 定器设计与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(1): 162-169.

Niu Yuguang, Yang Wei, Li Xiaoming, et al. Design and simulation study of neural adaptive power system stabilizer of DFIG[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(1): 162-169.

[14] 张禄, 金新民, 战亮宇, 等. 电网电压不对称跌落下双 馈风电机组转子电压分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 136-142.

Zhang Lu, Jin Xinmin, Zhan Liangyu, et al. Rotor voltage analysis of doubly fed induction generator under unsymmetrical grid voltage dips[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 136-142.

http://www.china-simulation.com

34(29): 5188-5203.