

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200884

实现转子转速保护的双馈异步发电机有功输出速降新方案

邓兆顺¹, 朱介北¹, 俞露杰¹, 邱威², 曲春辉³, 贾宏杰¹, 王成山¹

(1. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072; 2. 国家电力调度控制中心, 北京 100031;
3. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 当电网发生输电阻塞、直流闭锁、短路故障等异常状况时, 迅速降低风电机组有功输出可有效减小系统发生安全稳定事故的风险。风电机组的变流器能够快速准确地控制有功输出, 然而, 由于桨距角动作缓慢, 风力机捕获的机械功率难以及时调整以匹配速降后的有功输出, 所累积的盈余能量易造成转子过转速, 损害风力机机械系统。为此, 提出一种通过协调控制直流卸荷电路与风力机桨距角实现转子转速保护的双馈异步发电机(Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)有功输出速降方案。在通过转子侧变流器将有功输出迅速降至指令值后, 即投入卸荷电阻消耗不平衡能量来及时抑制过转速, 同时尽快调整桨距角从根本上消除盈余能量, 切出卸荷电阻, 在更长时间尺度下维持初始转速。分别在执行上级有功速降指令与低电压穿越两种场景下, 通过与现有仅依赖桨距角或能量装置的两种典型DFIG功率控制方案和常用撬棒保护方案的仿真对比, 验证了该方案的多方面优越性。
关键词: 双馈异步发电机; 紧急功率控制; 盈余功率; 直流卸荷电路; 桨距角控制

A novel fast active power output reduction scheme of a DFIG for rotor speed security

DENG Zhaoshun¹, ZHU Jiebei¹, YU Lujie¹, QIU Wei², QU Chunhui³, JIA Hongjie¹, WANG Chengshan¹

(1. School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. National Power Dispatching and Control Center, Beijing 100031, China;
3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Fast active Power output Reduction (FPR) of Wind Turbine Generators (WTGs) is an effective way to minimize risks of stability and security accidents of a connected power grid under abnormal conditions such as transmission congestion, DC blocking and short-circuit faults. An accurate FPR can be readily achieved by WTG power electronic drives. However, because of slowly-responsive pitch control, WTG mechanical input cannot be adjusted in a timely manner to match the reduced electrical output. The accumulated surplus energy may lead to rotor over-speed, posing the threat of damage to the WTG mechanical system. Therefore, this paper proposes an FPR scheme of a doubly-fed induction generator-based WTG in effort to avoid rotor over-speed by DC chopper and pitch control coordination. After the FPR command is executed by the rotor-side converter control, the rotor over-speed is first restrained earlier by triggering the DC chopper to dissipate the excessive energy. The pitch angle is controlled at maximal rate to eliminate excessive power, switch off the DC chopper and maintain the rotor speed at the original level over a longer period. The various advantages of the proposed FPR scheme over two typical ones are verified through comparative simulation studies, under scenarios of higher-level power command execution and low voltage ride-through.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGSXDK00DJJS1900108).

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG); emergency power control; surplus power; DC chopper; pitch control

0 引言

随着环境污染和能源危机的加剧, 可再生能源

发电越来越受到人们的青睐, 其中风力发电凭借其显著成本优势获得广泛应用。目前广泛采用的变速型风力发电机在传统控制方式下运行在最大功率跟踪点(Maximum Power Point Tracking, MPPT)^[1], 其有功输出具有随机波动性, 且与电网频率不直接耦合导致系统惯量降低。风电渗透率的不断提高给电

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(SGSXDK00DJJS1900108)

网的安全稳定运行带来的挑战日趋显著^[2]。

因此,当电网发生某些异常状况时,可以通过快速降低风电场对外输出的功率来有效提升电网的安全稳定性。近年来,世界各国纷纷制定了一系列风电场并网规程^[3-5],大都要求风电机组具备快速控制其有功输出的能力。目前工业界广泛要求在以下紧急状况下能够迅速降低风电机组的有功输出:

1) 在风速较高时,风电场对外发电能力往往超过输电线路容量,导致线路过载,影响输电线路运行安全^[6]。例如,我国“三北”地区风能资源丰富但地理位置偏远,当地负荷消纳能力有限,长距离输电网的建设跟不上风电发展步伐,这一问题时有发生^[7-8]。

2) 当低惯量系统出现发电与负荷不平衡,容易导致系统频率快速升高。例如,西北地区的风火打捆经特高压直流外送系统容易出现换相失败^[9-10],阻断功率外送,导致送端电网出现高频不稳定问题。

3) 双馈异步发电机(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)在进行低电压穿越(Low-Voltage Ride-Through, LVRT)期间易出现暂态过电流,损害机组内部的变流器,通过投入转子撬棒(Crowbar)电路^[11]可有效解决这一问题,但这会使DFIG丧失功率控制能力,且撬棒的切入与切出会对电网带来一定的冲击。文献[12]证实电压跌落瞬间主动、迅速地降低DFIG有功输出可以有效抑制过电流,从而避免投入撬棒。此外,降低有功功率还能防止低电压期间风电机组与电网失去同步,并可以使风电机组发出更多无功来支持电网电压恢复^[13]。英国电网规程明确要求,在电压骤降期间,应根据残余电压幅值成比例地调整风电机组的有功输出^[14]。

采用高频脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)技术的电力电子变流器可以在100 ms内实现对风力发电机有功输出的柔性及精准控制,已有很多研究提出了不同形式的具体实施方案:文献[15-16]提出通过在低风速下提高转子转速,高风速下调整桨距角实现降低DFIG有功输出的方案;文献[12]提出在检测到电网电压跌落时,迅速将DFIG的转子侧变流器的电磁转矩指令降为零,以便更安全地实现低电压穿越。然而,当采用上述方案来实现风电机组的大幅有功输出速降时,风力发电机械输入与有功输出间的不匹配产生的盈余功率会累积在转子动能中,造成转子过转速,损害风力机械部件甚至引发停机。尽管调整桨距角可以减小机械输入来与有功输出匹配,但其动作缓慢,需要数秒时间。

因此,有必要在功率速降后及时投入额外的储能或耗能设备来吸收这部分盈余能量:将储能系统引入风电中能够有效提高风电功率的可控性,这已成为一大研究热点^[17];文献[18-19]提出了风力发电机与储能的协调控制策略。但储能成本较高,在功率速降这种启用频率较低的场合不够划算;且储能技术还存在能量密度低、充放电速率低、寿命短等诸多限制^[20-21]。此外,已有研究提出引入直流卸荷电路提高风力发电机的低电压穿越性能^[22-23],它与储能装置相比具有明显的成本优势。

然而,上述基于储能或卸荷装置的风力发电机功率控制方案都未调整传统MPPT运行模式,这使得不平衡能量持续存在,功率速降后的盈余能量问题未能得到根本解决。能量装置需要持续运行来吸收这些盈余能量,这无疑增加了它们的运行成本^[24]。文献[20]提出了一种基于直流卸荷电路的永磁直驱同步发电机功率速降方案,这一方案通过调整桨距角来最终消除不平衡能量以切出卸荷电阻,但类似的应用在DFIG的解决方案还未见报道。

针对上述问题,本文提出一种借助直流卸荷电路实现转子转速保护的DFIG有功输出速降方案。该方案能够在功率速降后的初期及时投入卸荷电阻以消耗不平衡能量,并通过快速调整桨距角来完全消除盈余能量并切出卸荷电阻。在执行上级功率速降指令和低电压穿越两种场景下,通过与现有仅依赖桨距角或能量装置的两种典型DFIG功率控制方案和常用的撬棒保护方案仿真对比,验证了本方案的优越性,即通过在不同时间尺度下启用卸荷电路和桨距角,充分保证了有功输出速降后的转子运行安全,并避免卸荷电路的持续运行。

1 DFIG 数学模型与传统控制策略概述

配备直流卸荷电路的DFIG系统的基本结构如图1上半部分所示,其中卸荷电路并联于背靠背变流器的直流母线,由一个IGBT开关和一个卸荷电阻串联组成。DFIG的数学模型和传统控制方案是设计本文方案的基础,下面进行简要介绍。

1.1 异步发电机数学模型

DFIG中的发电机部分通常用定转子电压平衡方程和磁链方程描述,它们在同步 $d-q$ 坐标系下的标幺制形式的表达式为

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 \\ 0 & -R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{slip} \\ \omega_{slip} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -X_s & 0 & X_m & 0 \\ 0 & -X_s & 0 & X_m \\ -X_m & 0 & X_r & 0 \\ 0 & -X_m & 0 & X_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{u}_s = \mathbf{u}_{sd} + j\mathbf{u}_{sq}$ 和 $\mathbf{u}_r = \mathbf{u}_{rd} + j\mathbf{u}_{rq}$ 分别为定、转子电压矢量; $\mathbf{i}_s = i_{sd} + ji_{sq}$ 和 $\mathbf{i}_r = i_{rd} + ji_{rq}$ 分别为定、转子电流矢量; $\boldsymbol{\psi}_s = \psi_{sd} + j\psi_{sq}$ 和 $\boldsymbol{\psi}_r = \psi_{rd} + j\psi_{rq}$ 分别为定、转子磁链矢量; R_s 和 R_r 分别为定、转子电阻; $X_s = X_{ls} + X_m$, $X_r = X_{lr} + X_m$, 其中 X_{ls} 和 X_{lr} 分别为定、转子漏电抗; X_m 为励磁电抗; ω_s 、 ω_r 分别为定、转子的电角速度; ω_b 为它们的基值; 转差率 $\omega_{slip} = \omega_s - \omega_r$ 。

1.2 风力机空气动力特性

以速度 v_w 穿过半径为 R_{WT} 的叶片的风中包含的动能形式的功率 P_0 计算式为

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho \pi R_{WT}^2 v_w^3 \quad (4)$$

式中, ρ 为空气密度。

根据贝兹定律, P_0 中只有一部分可以被风力机捕获, 成为机械输入功率 P_m 。

$$P_m = C_p(\lambda, \beta) P_0 = \frac{1}{2} \rho S C_p(\lambda, \beta) v_w^3 \quad (5)$$

式中, C_p 称为风能利用系数, 它是一个关于叶尖速比 λ 和桨距角 β 的非线性函数, 可以表达为

$$\begin{cases} C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (6)$$

式中, 叶尖速比 λ 由实时转子转速 ω_r 和风速 v_w 之间的比例确定, 如式(7)所示。

$$\lambda = \omega_b R_{WT} \frac{\omega_r}{v_w} \quad (7)$$

根据式(5), 在 MPPT 运行模式下, C_p 应保持在其最大值 C_{pmax} 以捕获最大风能功率; 由式(6)能够推知, 这需要通过将桨距角固定在 0° 并将叶尖速比维持在最优值 λ_{opt} 来实现。根据式(7), 为维持最优叶尖速比 λ_{opt} , 需要根据实时风速成比例地调整

转子转速, 如式(8)所示。

$$\omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{\omega_b R_{WT}} v_w \quad (8)$$

1.3 传统控制策略概述

图 1 灰色虚线框中的黑色模块展示了 DFIG 的传统控制策略。转子侧变流器(Rotor-Side Converter, RSC)和网侧变流器(Grid-Side Converter, GSC)都基于同步 d - q 坐标系, 采用比例积分(Proportional-Integral, PI)控制器的功率外环和电流内环级联的典型控制结构。当坐标系的 d 轴通过锁相环(Phase-Locked Loop, PLL)以定子电压定向时, 定子三相稳态电压的 d - q 分量可表示为

$$\begin{cases} u_{sd} = |u_s| \\ u_{sq} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

为通过控制 RSC 实现 DFIG 的 MPPT 功能, 定子功率参考值 P_s^* 可根据当前转子转速和图 1 中的 MPPT 曲线得出, 进而通过 PI 控制器生成电流内环的转子有功电流 i_{rd} 的参考值。

$$i_{rd}^* = (k_p + \frac{k_i}{s})(P_s^* - P_s) \quad (10)$$

类似地, 为通过控制 GSC 将直流电压 u_{dc} 维持在额定值, GSC 有功电流 i_{gd} 的参考值为

$$i_{gd}^* = (k_p + \frac{k_i}{s})(u_{dc}^* - u_{dc}) \quad (11)$$

风力机桨距角通常保持在 0° 附近以保证最大风能利用率。但当风速过高致使转子超出其最大允许值 ω_{max} 时, 需要通过增大桨距角来减小机械输入转矩, 以抑制转速上升。PI 控制下的桨距角指令值 β_{cmd} 计算式为

$$\beta_{cmd} = (k_p + \frac{k_i}{s})(\omega_r - \omega_{max}), 0 \leq \beta_{cmd} \leq \beta_{max} \quad (12)$$

然而, 在工业应用中, 桨距角的调整需要由伺服系统驱动叶片旋转实现, 变桨速率有限, 通常需要数秒时间才能调整到指令值。因此, 当有功输出大幅快速下降时, 仅通过调整桨距角来消除盈余功率会导致严重的转子过转速。

2 DFIG 有功输出速降方案

2.1 RSC 直接有功控制

根据图 1 中标注的功率方向, 输送至电网的功率 P_g 来自定子功率 P_s , 盈余部分 P_g 通过 GSC 转移到直流母线。根据感应电机模型式(1)一式(3)并忽略定转子电阻损耗, 它们的计算表达式为

$$\begin{cases} P_e = P_s - P_g \\ P_s = |\mathbf{u}_s| i_{sd} = \frac{X_m}{X_s} |\mathbf{u}_s| i_{rd} \\ P_g = |\mathbf{u}_s| i_{gd} \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)的第二个式子或传统控制环式(10)可知, 定子功率 P_s 可直接由转子电流 i_{rd} 控制, 而 P_g 会因暂态过程中卸荷电阻的切入切出发生波动, 进而干扰输出功率 P_e 的平稳控制。

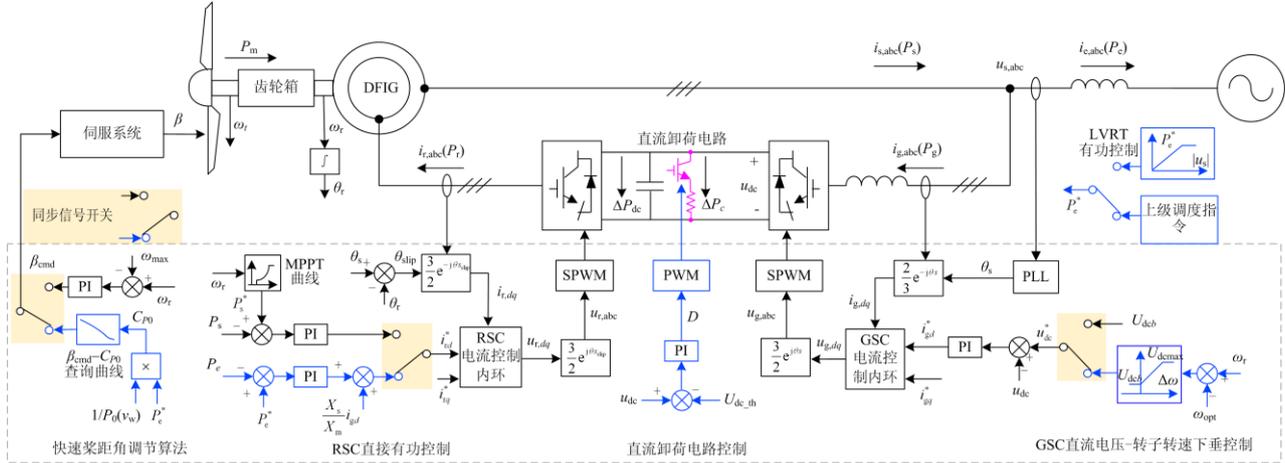


图 1 含直流卸荷电路的 DFIG 主系统结构、传统控制方案(灰色虚线框内黑色模块)和本文所提方案(蓝色模块)
Fig. 1 Configuration of DFIG-based wind turbine equipped with a DC chopper and its conventional (shown as black blocks in the gray dashed box) and proposed (shown as blue blocks) control schemes

为避免这一问题, 本文提出在有功外环 PI 控制器后加入前馈解耦项, 来抵消 P_g 的扰动。图 2 根据式(13)画出了从功率速降指令 P_e^* 到实际有功输出 P_e 的简化闭环传递函数, 其中 k_{p1} 和 k_{i1} 分别为功率外环 PI 控制器的比例系数和积分系数, K 为前馈解耦项; 考虑到电流控制内环响应速度很快, 认为电流实际值 i_{rd} 能实时跟踪电流参考值 i_{rd}^* 。容易得到当 K 取 $X_s i_{gd} / X_m$ 时, 可以抵消功率项 P_g 的扰动。

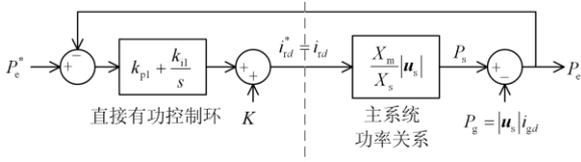


图 2 RSC 直接有功控制的前馈解耦原理示意图
Fig. 2 Schematic diagram of feedforward decoupling principle in RSC direct active power control loop

因此, 本方案直接有功控制环的表达式为

$$i_{rd}^* = (k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s})(P_e^* - P_e) + \frac{X_s}{X_m} i_{gd} \quad (14)$$

2.2 GSC 直流电压-转子转速下垂控制

如前所述, 通过 RSC 实现有功输出速降后, 输入输出间的不匹配产生的盈余能量易造成转子过转速。为了能够及时启动卸荷电路来吸收不平衡能量,

在转子转速超过其初始运行点 ω_{opt} 时, 需控制直流电压随转子转速快速上升。为此, 本方案提出在传统直流电压环式(11)的前端加入直流电压-转子转速 ($u_{dc}^* - \Delta\omega$) 下垂控制环节, 如式(15)所示。

$$u_{dc}^* = u_{dcb} + k(\omega_r - \omega_{opt}), \quad u_{dcb} \leq u_{dc}^* \leq u_{dcmax} \quad (15)$$

式中, k 是 $u_{dc}^* - \Delta\omega$ 下垂曲线的斜率。

2.3 直流卸荷电路控制

为通过与 2.2 节提出的 $u_{dc}^* - \Delta\omega$ 下垂控制环相配合, 及时启动卸荷电路来抑制过转速, 本方案为卸荷电路设定了一个略高于正常运行水平的触发阈值, 当直流电压超过该阈值时立即投入卸荷电阻。

为保证卸荷电阻耗散功率的连续变化, 避免影响有功输出的平稳控制, 本方案采用 PI 控制器, 在检测到直流电压超过设定阈值 $u_{dc,th}$ 时, 输出占空比为 D 的高频 PWM 信号来控制卸荷电路的 IGBT 开关:

$$D = (k_p + \frac{k_i}{s})(u_{dc} - u_{dc,th}), \quad 0 \leq D \leq 1 \quad (16)$$

2.4 快速桨距角调整算法

通过调整桨距角可以减小风力机械输入功率, 有助于不平衡能量的抑制与消除。然而, 由于桨距角调整速率有限, 传统 PI 控制的控制参数难以整定, 使得其转速控制效果变差^[25]。

为充分抑制转速上升, 本方案引入快速桨距角

调整算法, 它依据接收到的功率速降指令 P_e^* , 通过以下两个步骤直接给出桨距角指令值 β_{cmd} :

1) 计算当机械输入功率 P_m 和有功指令 P_e^* 相等时对应的风能利用系数 C_{p0} 。

$$C_{p0} = \frac{P_e^*}{P_0(v_w)} \quad (17)$$

式中, P_0 是风速 v_w 的函数, 已在式(4)中定义。

2) 由上一步得出的 C_{p0} 和图3所示的 $\beta_{\text{cmd}} - C_{p0}$ 查询曲线得到桨距角指令值 β_{cmd} (查询曲线由式(6)在 $\lambda = \lambda_{\text{opt}}$ 时得出)。

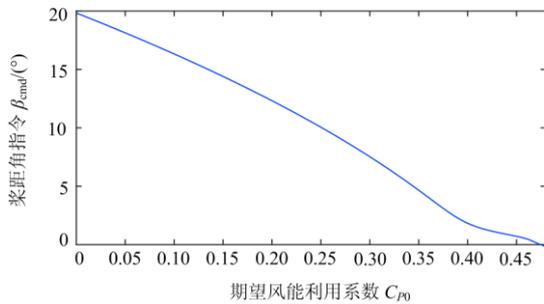


图3 快速桨距角调整算法的 $\beta_{\text{cmd}} - C_{p0}$ 查询曲线

Fig. 3 $\beta_{\text{cmd}} - C_{p0}$ lookup curve of fast pitch regulation algorithm

通过上述算法, 在启动功率下降的瞬间, 桨距角会以最大速率朝着指令值 β_{cmd} 进行调整, 协助卸荷电路进一步抑制转速上升。更重要的是, 当桨距角调整到达指令值时, 输入输出间的不平衡功率可被完全消除, 从而在较短时间内切出卸荷电阻, 并将转速维持在功率下降前的初始值 ω_{opt} 。

2.5 附加 LVRT 低电压穿越能力

如引言中所述, 电压跌落时立即降低 DFIG 有功输出能多方面提升机组自身和电网的安全稳定性。为此, 在检测到电网电压跌落且低于预设的交流电压阈值 $u_{\text{ac_th}}$ 时, 启用图1所示的 LVRT 有功控制环, 使得 RSC 直接有功控制环式(14)的参考值 P_e^* 随定子电压幅值 $|\mathbf{u}_s|$ 跌落成比例地下降, 从而实现故障下的 DFIG 有功功率速降。

具体的有功指令生成规则为

$$P_e^* = P_0 + k_{\text{LV}} (|\mathbf{u}_s| - U_0), \quad |\mathbf{u}_s| < U_{\text{ac_th}} \quad (18)$$

式中: P_0 、 U_0 取功率和交流电压的额定值; k_{LV} 为该控制的下垂系数。

本方案的 LVRT 性能将会在 4.2 节加以仿真验证。

2.6 方案的总体流程

图4展示了 2.1—2.5 节所述方案的总体流程。

当接收到来自上级调度或 LVRT 有功控制环节的功率速降指令时, 通过改变图1浅黄色区域的同步信号开关状态, DFIG 控制系统即可从传统控制模式切换到本文提出的方案。

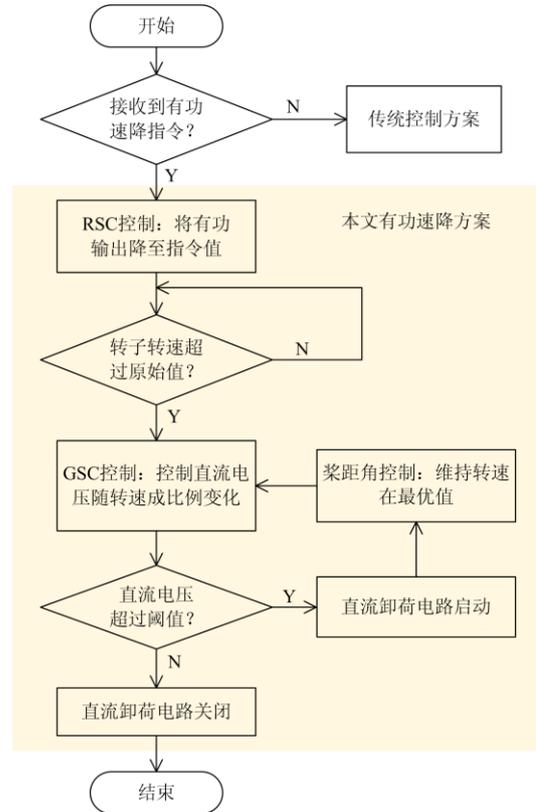


图4 本文方案的总体流程

Fig. 4 Overall procedure of the proposed scheme

RSC 直接有功控制环迅速将有功输出平稳地降至指令值。功率速降产生的盈余功率最初以转子动能的形式积聚, 致使电机转子转速的上升。通过 GSC 控制中附加 $u_{\text{dc}}^* - \Delta\omega$ 下垂环节的作用, 直流母线电压也会随转子转速上升。当直流电压上升至卸荷电路触发阈值时, 投入卸荷电阻来消耗盈余能量, 从而有效抑制转子过转速。与此同时, 快速桨距角调整算法以最大速率增大桨距角来进一步抑制转速上升, 当直流电压随转速降至卸荷电路触发阈值以下时, 最终切出卸荷电阻并将转速维持在功率下降前的初始值。可见, 直流卸荷电路和桨距角控制在不同时间尺度下发挥作用, 有效保证转子运行安全。

与仅依赖桨距角的传统方案相比, 本方案通过快速启动直流卸荷电路可以更及时地抑制过转速; 与仅使用卸荷电路等能量装置的 DFIG 典型功率控制方案^[17-18]相比, 本方案通过协调控制卸荷电路和桨距角, 减少了卸荷电阻的投入时间。这些优势会在第4部分加以仿真验证。

3 提升方案稳定性的控制参数优化

为提升本方案的稳定性，本节基于小信号分析对本方案新引进控制环节的有功功率、直流电压 PI 控制参数进行优化。

首先，建立整个系统的状态方程，其中包含异步发电机式(1)一式(3)、风力机空气动力特性式(5)一式(7)、含新方案式(14)一式(17)的控制系统以及在文献[26]列出的两质量块轴系和直流母线模型。其次，将上述状态方程线性化为如式(19)形式。

$$\frac{d\mathbf{D}\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{D}\mathbf{x} \quad (19)$$

式中： $\mathbf{D}\mathbf{x}$ 代表所有状态变量受扰动后的变化量； \mathbf{A} 称为状态矩阵。矩阵 \mathbf{A} 中的 DFIG 主系统与控制系统参数在表 1 列出。根据矩阵 \mathbf{A} 可求得系统各参数变化时的特征根轨迹。

表 1 DFIG 主系统与控制系统参数

Table 1 DFIG main and control system parameters

名称	数值
额定容量 S_b	100 MVA
定子侧额定电压 U_b	575 V
系统频率 f_b	60 Hz
桨距角最大调整速率	5(°)/s
桨距角最大角度	30°
最大允许转速 ω_{max}	1.1 p.u.
轴系互阻尼系数 D_{sh}	1.5
轴系刚度系数 K_{sh}	0.15 p.u./(\text{°})
风轮机惯性时间常数 H_f	4.29 s
异步机惯性时间常数 H_t	0.9 s
定子电阻 R_s	0.023 p.u.
定子漏抗 $X_{s\sigma}$	0.18 p.u.
转子电阻 R_r	0.016 p.u.
转子漏抗 $X_{r\sigma}$	0.16 p.u.
励磁电抗 X_m	2.9 p.u.
直流母线额定电压 U_{dcb}	1 150 V
直流电容 C	84 mF
直流卸荷电阻 R_c	0.26 Ω
直流卸荷电路开关频率	1 kHz
RSC 电流内环 PI 参数	(0.5, 10)
GSC 电流内环 PI 参数	(1.5, 5)

为优化 RSC 直接有功控制环的比例系数 k_{p1} 、积分系数 k_{i1} 和 GSC 直流电压控制环的比例系数 k_{pdc} 、积分系数 k_{idc} ，本文展示了这四个参数变化时系统主导特征根轨迹，如图 5 所示。

由图 5(a)可见，当 k_{p1} 增加时，特征根 $\lambda_{1,2}$ (频率保持在 $\pm 4\ 000$ rad/s 附近)迅速右移，并在 k_{p1} 超过 4 后越过虚轴。图 5(b)表明，增大 k_{i1} 使特征根 $\lambda_{3,4}$ 的

阻尼比增加，系统变得更加稳定。从图 5(c)可以观察到，增大 k_{pdc} 使得特征根 $\lambda_{5,6}$ 先逐渐远离虚轴且阻尼比增加，在其超过 6 时成为两个实根且其中一个再次向虚轴靠近。从图 5(d)可以看出，增加 k_{idc} 会明显减小 $\lambda_{5,6}$ 的阻尼比，使直流电压响应的超调增大。

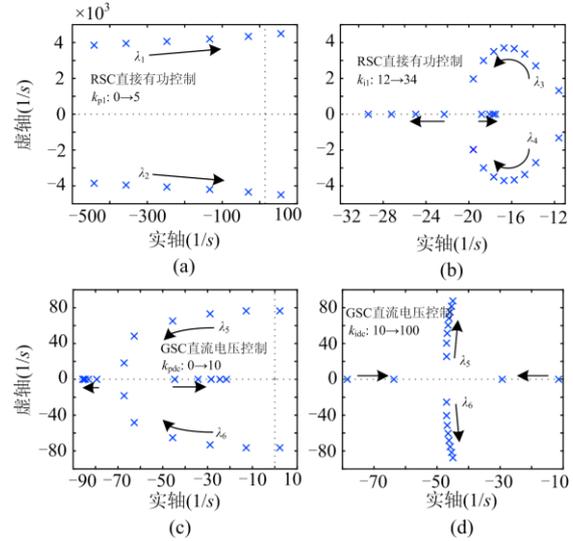


图 5 本文方案不同控制参数的主导特征根轨迹

Fig. 5 Dominant eigenvalue loci of different controller parameters of the proposed scheme

根据图 5 展示的系统稳定性的变化规律，本文方案引入的控制环节的最优参数选取为 $k_{p1} = 0.5$ ， $k_{i1} = 100$ ， $k_{pdc} = 4$ ， $k_{idc} = 40$ 。

为进一步确保小信号分析的正确性和参数优化的有效性，本文首先基于状态空间模型与平均值模型，对比了参数优化前后有功功率在 0.05 s 时由 0.8 p.u.降至 0.1 p.u.的响应波形，如图 6 所示。

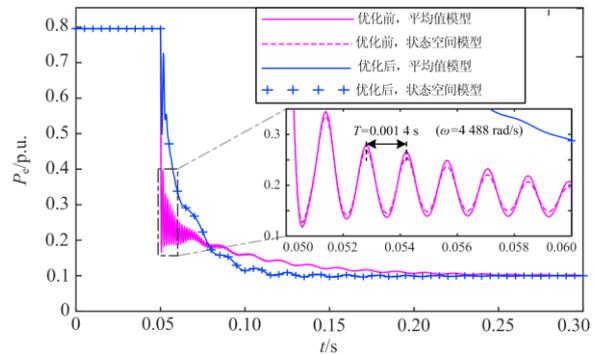


图 6 参数优化前后，状态空间模型与系统平均值模型下功率速降响应对比

Fig. 6 Comparative responses of active power output reduction under state-space equation and average model, with un-tuned and tuned parameters

可见, 状态空间模型与平均值模型下的暂态响应基本吻合, 从而验证了上述稳定性分析的准确性。其次, 在参数优化前的系统中, 功率突降激发出角频率为 $4\ 488\ \text{s}^{-1}$ 的明显振荡, 这一频率和图 5(a)所示的受有功控制比例系数影响大的特征根虚部基本一致; 根据参数优化后的系统响应结果可知, 参数优化使得这一高频振荡被完全消除, 且有功的调整时间变短, 证明了本节参数优化的必要性与有效性。

4 对比仿真研究

为评估所提出方案在 DFIG 有功输出速降和抑制转子过转速方面的性能, 本文在 Matlab/Simulink 中搭建了 DFIG 并网系统模型, 其中 RSC 和 GSC 均采用含开关电路的两电平变流器详细模型。主系统拓扑结构如图 7 所示, 一台容量为 10 MW 的 DFIG 通过一台 575 V/25 kV 升压变压器和 30 km 输电线路接至 25 kV 无穷大电网。GSC 的额定容量为系统额定容量的 50%。风速设定为 10 m/s, 在该工况下, DFIG 在 MPPT 下运行在额定转速并对外输出 0.8 p.u. 的有功功率。主系统和控制系统参数参见表 1 和第 3 节确定的最优参数。

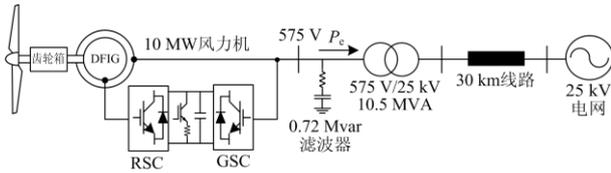


图 7 DFIG 并网仿真系统单线图

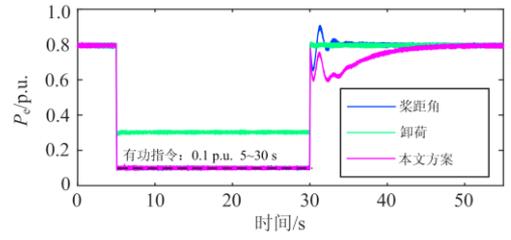
Fig. 7 Single-line diagram of simulated grid-connected DFIG-based wind turbine system

本文选取以下两种场景对 DFIG 功率速降方案进行仿真研究: (a) 正常电压水平下, 上级调度机构下达有功输出速降指令; (b) 低电压穿越时的功率速降。

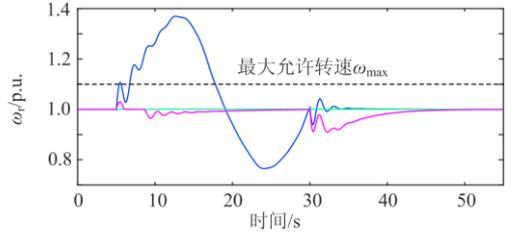
4.1 有功输出速降指令的执行

为验证所提方案执行 DFIG 有功输出速降指令的优越性, 将所提方案与以下两种典型的 DFIG 功率控制方案进行对比。典型方案一: 通过修正传统控制策略的 RSC 有功参考值实现有功指令跟踪; 暂态过转速仅通过传统桨距角 PI 控制器进行抑制, 不引入任何能量装置。将这一方案标注为“桨距角”。典型方案二: RSC 保持传统 MPPT 控制, GSC 控制有功输出跟踪指令值, 引入直流卸荷电路抑制直流过电压^[17-18], 卸荷电路各参数与本文方案相同。将这一方案标注为“卸荷”。

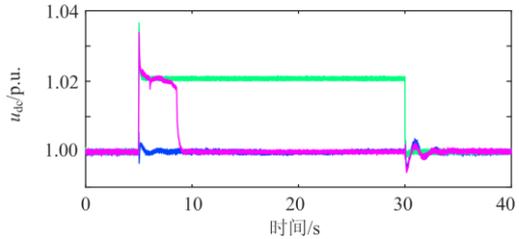
在三组不同方案下, DFIG 最初均运行在传统 MPPT 控制模式。忽略各阶段的通信延迟, 设在 5 s 时接收到有功速降指令, 要求其对外发出的有功功



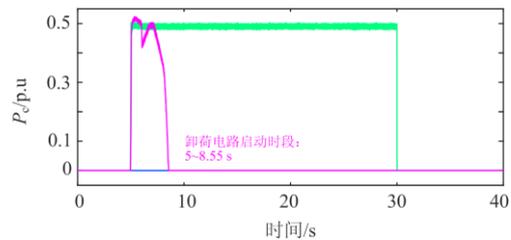
(a) 有功输出



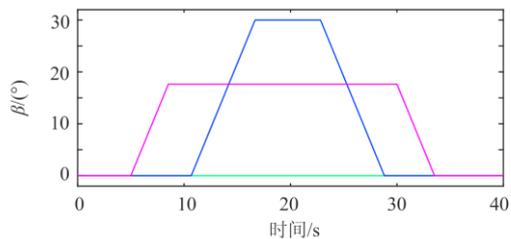
(b) 转子转速



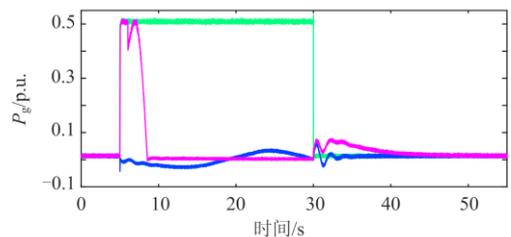
(c) 直流母线电压



(d) 直流卸荷电阻耗散功率



(e) 桨距角



(f) 流入GSC的有功功率

图 8 三种方案执行有功输出速降指令的对比仿真结果
Fig. 8 Comparative simulation results of execution of fast active power output reduction command

率降至 0.1 p.u., 并维持 25 s。如图 8(a)所示, 在接收到功率速降指令时, 本文方案和“桨距角”方案都能将 DFIG 的有功输出迅速降至指令值, 并在指令解除后逐渐恢复到 MPPT 下的水平; 而“卸荷”方案无法跟踪有功指令。这是因为“卸荷”方案仍然运行在 MPPT 控制模式, 机械输入恒为 0.8 p.u., 且 GSC 容量限制了卸荷电阻能够消耗的最大功率为 0.5 p.u., 因此理论上 DFIG 对外输出的最小功率为 0.3 p.u., 这和图 8(a)中“卸荷”方案的仿真结果一致。可见, “卸荷”方案的有功速降能力有限。

图 8(b)展示了功率速降后, “桨距角”方案有长达 10 s 的时间远远高于风力机的最大允许转速, 严重危害其机械系统。相比之下, 在本文所提出方案下, 转子转速得到充分抑制, 并维持在功率降低前的初始值附近。这是因为本文方案不仅更加及时地启动桨距角控制(由图 8(e)可见), 而且引入直流卸荷电路快速吸收了盈余能量。

图 8(c)说明在功率速降下, 本文方案与“卸荷”方案的直流母线电压都会有所上升, 从而有效触发卸荷电阻投入运行吸收盈余能量。从图 8(d)和图 8(f)可以看出, “卸荷”方案下的盈余能量会持续流经 GSC 并被卸荷电阻耗散, 而本文方案则可以在功率速降后的 3.55 s 达到输入输出功率的平衡, 并切出卸荷电阻。

通过与仅启用桨距角或卸荷电路控制的“桨距角”和“卸荷”方案对比, 本文方案在执行功率速降指令时的优势得到了充分的体现。总的来说, 本文方案综合了上述两种方案的优势, 通过在不同时间尺度下协调控制卸荷电路和桨距角, 有效避免了功率速降后转子过转速的发生。

4.2 低电压穿越性能

为验证所提方案的 LVRT 性能及优越性, 本文设定在 0.5 s 时输电线路发生三相对称短路故障, 定子电压跌落 80%, 故障在 625 ms 后切除, 并对本文方案与传统转子撬棒保护方案^[11]的响应进行对比, 其中本文方案中附加 LVRT 环节的参数取为 $k_{LV} = 1$, $U_{ac_th} = 0.8$ p.u.。

如图 9(f)所示, 在发生电压跌落的瞬间, 传统撬棒保护方案的转子电流迅速升至 2 p.u. 阈值, 触发转子撬棒投入; 而本文方案通过启用附加 LVRT 下垂环节, 进行了主动的快速功率速降, 将转子电流抑制在了 1.5 p.u. 以下。因此, 采用本方案实现 DFIG 的低电压穿越时, 不需引入常用的撬棒保护装置。

传统撬棒保护下, 故障发生和切除后撬棒和 RSC 的开关动作会对系统造成一定程度的冲击, 如图 9(a)和图 9(d)所示。传统撬棒保护的电压幅值出现

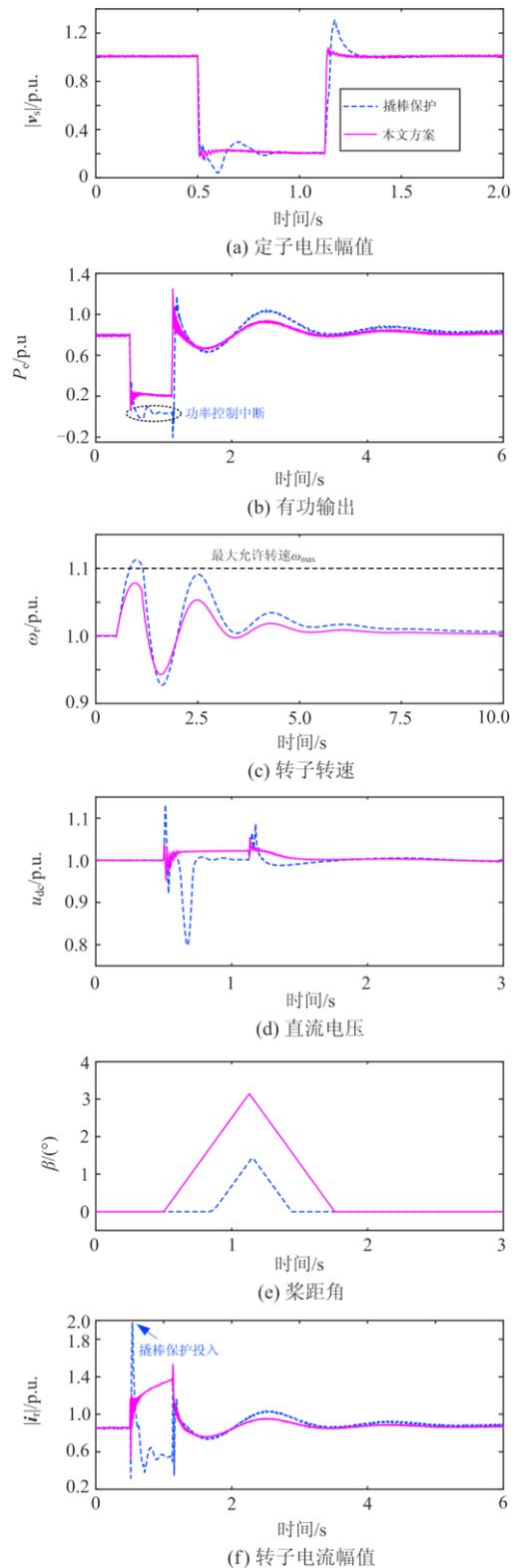


图 9 80%, 持续 625 ms 的电压跌落下, 本文方案与传统撬棒保护方案的对比仿真结果

Fig. 9 Comparative simulation results of a 625 ms-lasting 80% voltage dip between the proposed FPR scheme and the conventional scheme equipped with rotor crowbar protection

明显的暂态波动, 且直流母线电压偏离其额定值近 20%。相比之下, 本文方案的交流电压波形平稳, 直流电压在卸荷电路的作用下保持在 $\pm 5\%$ 的安全范围内。

此外, 传统撬棒保护方案在撬棒投入的同时闭锁 RSC, 这使得 DFIG 暂时丧失功率控制能力, 如图 9(b)所示。相比之下, 本文方案在故障期间可以不间断地向电网输出可控的有功功率。

最为重要的是, 由图 9(c)和图 9(e)可见, 本文所提方案能够更及时地启动桨距角控制, 从而更充分地抑制故障期间转子转速的上升。

通过以上对比可以得出, 本文方案具备良好的 LVRT 性能, 可以在故障期间不间断地向电网提供可控的有功功率并充分保证转子转速安全, 有效避免了传统撬棒保护带来的不足。

5 结论

本文针对 DFIG 有功功率速降后容易出现的转子超速问题, 提出了一种基于直流卸荷电路实现转子转速保护的 DFIG 有功输出速降方案。这一方案通过控制 RSC, 直接将有功输出速降至指令值; 在 GSC 控制中引入直流电压-转子转速下垂控制环节, 使直流电压随转子转速上升, 以便及时投入卸荷电阻消耗盈余能量来抑制过转速; 在接收到功率速降指令的同时, 快速桨距角调整算法以最大速率调整桨距角, 从而最终将转速维持在初始值并更早地切出卸荷电阻。

通过与仅依赖桨距角或直流卸荷电路实现 DFIG 功率控制的经典方案的对比仿真研究表明, 本文方案通过协调控制卸荷电路和桨距角, 充分利用了二者在不同时间尺度下处理盈余能量的优势, 不仅有效抑制了有功速降后的转子过转速, 而且从根本上消除了盈余能量, 避免了卸荷电路的持续工作; 在发生电压跌落时, 本文方案能有效提升 DFIG 的 LVRT 性能, 避免传统撬棒保护带来的不足。

参考文献

- [1] 胡家兵, 贺益康, 刘其辉. 基于最佳功率给定的最大风能追踪控制策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 32-38.
HU Jiabing, HE Yikang, LIU Qihui. Optimized active power reference based maximum wind energy tracking control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 32-38.
- [2] 王瑞明, 徐浩, 秦世耀, 等. 风电场一次调频分层协调控制研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 50-58.

- WANG Ruiming, XU Hao, QIN Shiyao, et al. Research and application on primary frequency regulation of wind farms based on hierarchical coordinated control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 50-58.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical rule for connecting wind farm to power system: GB/T 19963—2011[S]. 2011.
- [4] IEEE. IEEE Standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces: IEEE Std 1547—2018[S]. 2018.
- [5] ENTSO-E. Commission Regulation (EU) 2016/631 of 14 April 2016 establishing a network code on requirements for grid connection of generators[S/OL]. (2016)[2020-05-28]. <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/631/oj>.
- [6] 陈璟, 熊小伏, 胡剑, 等. 有功不平衡下计及低频减载影响的输电线路过载热保护[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 19-29.
CHEN Jing, XIONG Xiaofu, HU Jian, et al. Thermal overload protection of transmission lines considering the influence of UFLS under active power imbalance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 19-29.
- [7] LU H, WANG C, LI Q, et al. Reducing wind power curtailment in China: comparing the roles of coal power flexibility and improved dispatch[J]. Climate Policy, 2019, 19(5): 623-635.
- [8] 张梦婕, 叶荣, 林章岁, 等. 考虑热载能力的风火打捆外送线路截面和火电容量联合优化[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(4): 91-98.
ZHANG Mengjie, YE Rong, LIN Zhangsui, et al. Joint optimization of wind-thermal bundling transmission line cross-section and thermal power capacity considering heat capacity[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4): 91-98.
- [9] 屠竞哲, 张健, 刘明松, 等. 风火打捆直流外送系统直流故障引发风机脱网的问题研究[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3333-3338.
TU Jingzhe, ZHANG Jian, LIU Mingsong, et al. Study on wind turbine generators tripping caused by HVDC contingencies of wind-thermal-bundled HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3333-3338.
- [10] 王超, 张红丽, 刘福锁, 等. 新能源集群送出交直流系

- 统多稳定问题演化机理及防控措施[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 77-84.
- WANG Chao, ZHANG Hongli, LIU Fusuo, et al. Evolution mechanism of multiple stability problems and control strategies of AC/DC power system with large-scale wind turbine generators[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 77-84.
- [11] 弗拉基斯拉夫 阿赫玛托夫. 风力发电用感应发电机[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [12] YANG L, XU Z, OSTERGAARD J, et al. Advanced control strategy of DFIG wind turbines for power system fault ride through[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 27(2): 713-722.
- [13] GÖKSU Ö. Control of wind turbines during symmetrical and asymmetrical grid faults[D]. Denmark: Aalborg University, 2012.
- [14] National Grid ESO (UK). The grid code[S/OL]. (2019-09-04)[2020-05-28]. <https://www.nationalgrideso.com/codes/grid-code>.
- [15] JANSSENS N A, LAMBIN G, BRAGARD N. Active power control strategies of DFIG wind turbines[C] // 2007 IEEE Lausanne Power Tech, July 1-5, 2007, Lausanne, Switzerland: 516-521.
- [16] 赵冬梅, 许瑞庆, 郑立鑫. 全风况下双馈风机参与调频的协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 53-59.
- ZHAO Dongmei, XU Ruiqing, ZHENG Lixin. Research on coordinated control strategy for DFIGs participating in system frequency regulation with different wind[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 53-59.
- [17] 田蓓, 王朝晖, 张爽, 等. 面向风光综合消纳的电力系统广域储能容量优化配置研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 67-72.
- TIAN Bei, WANG Zhaohui, ZHANG Shuang, et al. Wide-area optimized allocation of energy storage capacity considering wind/photovoltaic power accommodation in power systems[J]. Smart Power, 2020, 48(6): 67-72.
- [18] ABBEY C, JOOS G. Integration of energy storage with a doubly-fed induction machine for wind power applications[C] // 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, June 20-25, 2004, Aachen, Germany: 1964-1968.
- [19] SHI J, TANG Y, XIA Y, et al. SMES based excitation system for doubly-fed induction generator in wind power application[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 1105-1108.
- [20] ZHOU X, FAN Z, MA Y, et al. Research review on electrical energy storage technology[C] // 2017 36th Chinese Control Conference (CCC), July 26-28, 2017, Dalian, China: 10674-10678.
- [21] FAN S, YANG J, MA W, et al. A coordinated control scheme for power demand changes in a PMSG based multi-terminal DC wind farm[C] // IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, November 10-13, 2013, Vienna, Austria: 5224-5229.
- [22] PANNELL G, ZAHAWI B, ATKINSON D J, et al. Evaluation of the performance of a DC-link brake chopper as a DFIG low-voltage fault-ride-through device[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(3): 535-542.
- [23] 毕漆, 刘毅力, 尚小东, 等. 一种改进撬棒电路保护法在风电场 LVRT 中的应用[J]. 智慧电力, 2020, 48(11): 22-28.
- BI Qin, LIU Yili, SHANG Xiaodong, et al. Application of improved crowbar circuit protection method to LVRT of wind farm[J]. Smart Power, 2020, 48(11): 22-28.
- [24] YAN G, LIU D, LI J, et al. A cost accounting method of the Li-ion battery energy storage system for frequency regulation considering the effect of life degradation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 43-51. DOI: 10.1186/s41601-018-0076-2.
- [25] VAN T L, NGUYEN T H, LEE D C. Advanced pitch angle control based on fuzzy logic for variable-speed wind turbine systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(2): 578-587.
- [26] MOHAMMADPOUR H A, GHADERI A, SANTI E. Analysis of sub-synchronous resonance in doubly-fed induction generator-based wind farms interfaced with gate-controlled series capacitor[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(12): 1998-2011.

收稿日期: 2020-07-26; 修回日期: 2020-12-30

作者简介:

邓兆顺(1998—), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源发电并网控制与稳定性分析; E-mail: bsxdzs@126.com

朱介北(1987—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向包括柔性直流输电系统, 新能源发电系统, 电网规划与调度。E-mail: jiebei.zhu@tju.edu.cn

(编辑 周金梅)