

电网电压骤降故障时双馈风机虚拟阻抗改进控制技术*

王 璨, 余玉龙

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 233200)

摘 要: 针对电网电压骤降故障所导致的风电机组过电流问题, 已有的基于虚拟电阻的过电流抑制技术无法兼顾过电流抑制效果和基频控制性能, 同时未考虑系统的高频稳态性能, 导致故障穿越期间的谐波抑制性能较差。为了兼顾故障穿越性能及故障穿越期间的谐波抑制性能, 通过分析电网电压骤降时的双馈风机 (DFIG) 数学模型, 研究了过电流及暂态磁链抑制机理, 进一步基于虚拟阻抗技术, 提出了电网电压骤降故障时 DFIG 改进控制技术。通过在机侧变流器转子电流控制环路中引入附加控制环, 实现对暂态磁链振荡的抑制, 从而提升 DFIG 低电压穿越性能。进一步地, 对所提出的虚拟阻抗环节进行了参数设计分析, 保证了该控制方法可以兼顾过电流抑制性能、高频性能及基频控制性能。最后, 通过仿真结果验证了所提改进控制策略的有效性和可行性。

关键词: 双馈风机; 电网电压骤降故障; 虚拟阻抗; 过电流抑制

中图分类号: TM 614 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)09-0091-06

doi: 10.12177/emca.2020.106

Improved Control Strategy of DFIG Based on Virtual Impedance Under Grid Voltage Dip Fault*

WANG Can, SHE Yulong

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan 233200, China)

Abstract: In view of the over-current problem of wind turbines caused by voltage dips, the existing over-current suppression techniques based on virtual resistors cannot take into account both the over-current suppression effect and the fundamental frequency control performance. At the same time, the existing techniques do not consider the high-frequency steady-state performance of the system, leading to the poor harmonic suppression performance during the fault ride-through. In order to give consideration to both the performance of fault ride-through and the harmonic suppression during fault ride-through, the mechanism of over-current and transient flux suppression is studied by analyzing the mathematical model of doubly fed induction generator (DFIG) in the case of voltage dips, and based on the virtual impedance technique, an improved control technique for DFIG under voltage dips is proposed. In the improved control technique, an additional control loop is added to the rotor current control loop of the machine-side converter to suppress the transient flux oscillation and improve the performance of the DFIG. Furthermore, the parameters of the proposed virtual impedance link are designed and analyzed to ensure that the proposed control method can take into account over-current suppression performance, high-frequency performance and fundamental

收稿日期: 2020-04-26; 收到修改稿日期: 2020-07-20

* 基金项目: 安徽省自然科学基金项目 (1908085ME159)

作者简介: 王 璨 (1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为双馈风力发电系统故障穿越技术。

余玉龙 (1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能家居能效管理。

frequency control performance. Finally, simulation results verify the effectiveness and feasibility of the proposed improved control strategy.

Key words: doubly fed induction generator (DFIG); grid voltage dip fault; virtual impedance; over-current suppression

0 引言

清洁无污染的新能源和可再生能源是中国能源发展战略的重要方向。风力发电是新能源中技术最成熟、最具前景的发电技术。在风电系统中,双馈风机(DFIG)^[1-3]应用广泛。

与其他电机相比,DFIG 的特点在于变速恒频技术,并且能够独立解耦^[4]。在电网中,要求 DFIG 组必须具有低电压穿越(LVRT)的能力^[5-7],并且在实际风电场系统中,随着风力发电装机容量的不断扩大和并网准则的逐渐完善,还会要求 DFIG 具有高电压穿越(HVRT)的能力^[8]。

基于 DFIG LVRT 和 HVRT 性能的不同,实现的方法也有所不同。文献[7]提出了一种虚拟电阻控制技术,当电网电压发生骤降故障时,该技术使得转子电流减小、过渡过程加快,有效提高了 LVRT 的性能。文献[9]提出了一种在变流器直流侧增加 Crowbar 和 Chopper 电路的 LVRT 技术,并且 2 个电路相互配合工作可以缩短电压跌落恢复后的过渡时间。文献[10]提出了一种虚拟阻抗的控制方式,不仅能够抑制转子电流的振荡,也可以减少 HVRT 过程中电磁转矩的振荡对系统的影响。文献[11]提出在变流器直流侧增加斩波电路的 HVRT 技术,能够抑制变流器直流侧电压的增加,并且在电网故障时能实现控制解耦。上述方法可以单独提高 LVRT 或者 HVRT 的性能,但若同时要同时兼顾二者,则还需要提出新的方案。

本文通过 DFIG 的数学模型推导出其磁链的阻尼比,并由此引出其欠阻尼的特性。在电网电压骤降故障下,此特性对电机的稳定性会产生影响。在此基础上阐述并分析在机侧变流器加入虚拟阻抗的技术。该策略虽然能抑制转子过电流和过电压,但其有限频带过低并且还会恶化故障分量的抑制。为此,本文提出基于虚拟阻抗的改进控制策略。给出了改进控制器的设计原理,并通过仿真验证了所提方案的可行性。

1 DFIG 数学模型

DFIG 在 dq 坐标系下的等效电路如图 1 所示。

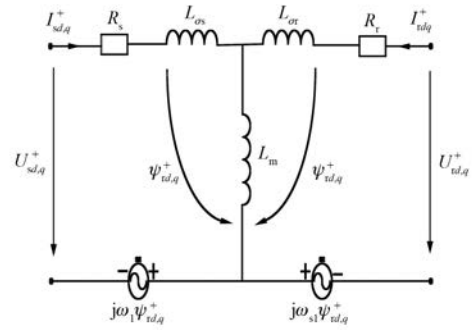


图 1 dq 坐标系下的 DFIG 等效电路

其磁链方程表达式为^[12-16]

$$\psi_{sd,q} = L_s I_{sd,q} + L_m I_{rd,q} \quad (1)$$

$$\psi_{rd,q} = L_m I_{sd,q} + L_r I_{rd,q} \quad (2)$$

式中: $\psi_{sd,q}$ 和 $\psi_{rd,q}$ 分别为 dq 坐标系下的定子磁链和转子磁链; L_s 为定子自感; $I_{sd,q}$ 和 $I_{rd,q}$ 分别为 dq 坐标系下的定子电流和转子电流; L_m 为定子和转子之间的互感; L_r 为转子自感。

由式(1)~式(2)及 DFIG 数学模型可以得出电压的表达式为^[15-16]

$$U_{sd,q} = R_s I_{sd,q} + p\psi_{sd,q} + j\omega_1 \psi_{sd,q} \quad (3)$$

$$U_{rd,q} = R_r I_{rd,q} + p\psi_{rd,q} + j\omega_{sl} \psi_{rd,q} \quad (4)$$

$$\omega_{sl} = \omega_1 - \omega_r \quad (5)$$

式中: $U_{rd,q}$ 和 $U_{sd,q}$ 为 dq 坐标系下的转子电压和定子电压; R_s 为定子电阻; p 为微分算子; ω_1 为 dq 坐标系下的同步角速度; R_r 为转子电阻; ω_{sl} 为滑差角速度; ω_r 为转子角速度。

可得 DFIG 磁链状态方程式为^[17]

$$p \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & \omega_1 & 0 & 0 \\ -\omega_1 & -a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -b & \omega_{sl} \\ 0 & 0 & -\omega_{sl} & -b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: $a = \frac{R_s}{L_s}$; $b = \frac{R_r}{L_r}$ 。

由式(6)可求出其特征方程式为

$$\begin{cases} s^2 + 2\frac{R_s}{L_s}s + \frac{R_s^2}{L_s^2} + \omega_1^2 = 0 \\ s^2 + 2\frac{R_r}{L_r}s + \frac{R_r^2}{L_r^2} + \omega_{sl}^2 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

特征值为

$$\lambda_{1,2} = -\frac{R_s}{L_s} \pm j\omega_1 \quad (8)$$

$$\lambda_{3,4} = -\frac{R_r}{L_r} \pm j\omega_{sl} \quad (9)$$

自然振荡频率 ω_n 和阻尼比 ξ 分别为

$$\omega_{n1,2} = \sqrt{\frac{R_s^2}{L_s^2} + \omega_1^2}, \xi_{1,2} = \frac{R_s}{\omega_{n1,2}L_s} \quad (10)$$

$$\omega_{n3,4} = \sqrt{\frac{R_r^2}{L_r^2} + \omega_{sl}^2}, \xi_{3,4} = \frac{R_r}{\omega_{n3,4}L_r} \quad (11)$$

当电网发生电压跌落故障时,DFIG 发电机侧转子电流和磁链都会产生剧烈的振荡。由式(10)和式(11)可知,阻尼比的大小会随着定转子的电阻改变而变化,而机侧阻尼比决定了暂态分量的衰减速度,此时可以考虑通过改变系统阻尼^[18]来使系统稳定。

2 虚拟阻抗控制策略

图2所示为加入虚拟阻抗 $R_v + sL_v$ 后 DFIG 的电流内环等效控制模型^[8]。

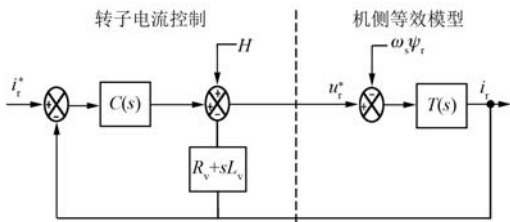


图2 加入虚拟阻抗后 DFIG 的电流内环等效控制模型

加入虚拟阻抗后 DFIG 电流内环等效控制模型中 PI 控制器的函数可表示为

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (12)$$

式中: K_p 和 K_i 分别为控制器中的比例、积分系数。

DFIG 的机侧变流器电流反馈项为 $R_v + sL_v$; 扰动项为 $H = \omega_s \sigma L_r i_r - \omega_s \frac{L_m}{L_s} \psi_s R_s$, 其中前半部分为电

流耦合项,后半部分为扰动项(在 dq 坐标系下此项是不存在的),可近似忽略不计。

未加虚拟阻抗时,电流内环被控对象的传递函数为

$$T(s) = \frac{1}{R_c + \sigma L_r s} \quad (13)$$

式中: R_c 为等效电阻, $R_c = R_r + R_s \left(\frac{L_m}{L_s} \right)^2$; σ 为漏感

系数, $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_r L_s}$ 。

加入虚拟阻抗后的表达式为

$$T_1(s) = \frac{1}{(R_c + R_v + sL_v) + \sigma L_r s} \quad (14)$$

虚拟阻抗 $R_v + sL_v$ 包括“虚拟电阻”^[7] R_v 和“虚拟电感”^[10] L_v , 它们并不真实存在于转子侧。

对比式(13)和式(14)可知,虚拟阻抗的加入增加了机侧等效电阻的大小,可以有效抑制转子电流内环的扰动。

虚拟阻抗中的 R_v 提升了控制器增益,增强了抑制低频谐振的性能,使得系统在低频段较稳定。在稳态情况下,DFIG 的带宽有限频段比较低^[7], 在加入虚拟电阻的基础上又串联了一个虚拟电感 L_v , 其存在可以抑制高频谐波,对转子侧的电流扰动具有抑制作用。因此,虚拟阻抗技术能有效抑制 DFIG 定子磁链的自由振荡,并且对低频扰动和高频谐振都有较好的抑制作用^[10]。

但虚拟电阻技术和虚拟电感技术都不是很完善。虚拟电阻技术中,DFIG 的等效电阻变大,对谐波的抑制作用也会更加明显。但在 DFIG 的转子侧加入虚拟电阻对全频带都会有影响,虚拟电阻会影响基频控制,因而虚拟电阻不能太大,抑制效果受限。另外,虚拟电感的引入会恶化故障分量的抑制,电阻和电感同时增加会削弱虚拟电阻的抑制作用。

为了在增加虚拟电阻的同时又能增大阻尼系数,提出引入前置滤波器 H_{Π} 对 R_v 做出改进,即代之以 $H_{\Pi} R_v$, 使得虚拟电阻不会对基频控制产生影响。同时引入前置滤波器 H_{Π} 对 L_v 做出改进,用 $H_{\Pi}(sL_v)$ 来改善高频谐振。

由此得出虚拟阻抗的改进控制器:

$$G(s) = H_{\Pi} R_v + H_{\Pi}(sL_v) \quad (15)$$

加入虚拟阻抗改进控制器后,DFIG 电流内环

等效控制模型如图 3 所示。

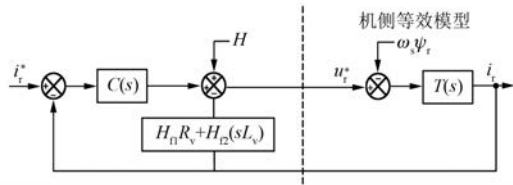


图 3 加入虚拟阻抗改进控制器后 DFIG 的电流内环等效控制模型

此时传递函数为

$$T_2(s) = \frac{1}{[R_c + H_{11}R_v + H_{12}(sL_v)] + \sigma L_r s} \tag{16}$$

即通过改变系统阻尼来使系统稳定。对比式(14)和式(16)可知,虚拟阻抗改进控制器在原基础上加了 2 个前置滤波器 H_{11} 和 H_{12} ,在故障分量频率点增大系统阻尼,同时又能在高频段增大转子等效电感,以提升电网谐波抗干扰能力。

3 DFIG 虚拟阻抗改进控制

图 4 为加入虚拟阻抗改进控制器后的 DFIG 控制框图。通过比例积分调节去除 dq 坐标系下转子电流的指令值扰动项,再经过 Park 逆变换使指令值所在坐标系由旋转变为静止,最后经过空间矢量脉宽调制(SVPWM)把两相静止电压调制成三相电压。

图 4 中虚拟阻抗改进控制器 $G(s)$ 的前置滤波器表达式为

$$H_{11} = \frac{2\varepsilon_1\omega_c s}{s^2 + 2\varepsilon_1\omega_c s + \omega_n^2} \tag{17}$$

$$H_{12} = \frac{s^2}{s^2 + \varepsilon_2 s + \omega_f^2} \tag{18}$$

因为阶数越高,系统易失稳,所以此处选用二阶。式(17)和式(18)中, ε_1 取值为 0.445, ε_2 取值为 0.707^[19], ω_c 取 20 rad/s^[19], $\omega_n = 2\pi f_1 = 100\pi$ rad/s, f_1 为基频,取 50 Hz; $\omega_f = 2\pi f_2 = 600\pi$ rad/s^[20] (由于在电网电压下 5、7 次谐波对应的是 300 Hz,所以 f_2 取值为 300 Hz)。

4 仿真分析与试验结果

为了验证虚拟阻抗改进控制策略对于 DFIG

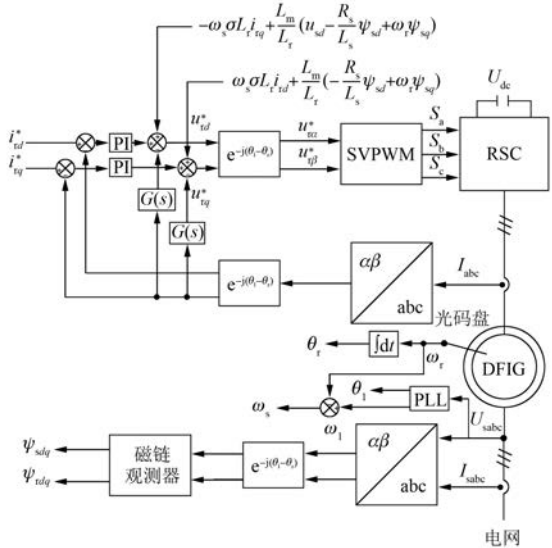


图 4 加入虚拟阻抗改进控制器时 DFIG 控制框图

性能改善的效果,在 MATLAB/Simulink 上搭建了 9 MW DFIG 仿真模型来进行研究。模型中定子侧的参数分别为: $U_s = 575$ V, $R_s = 0.023$ Ω , $L_s = 0.18$ H;转子侧的参数分别为: $U_r = 1\ 975$ V, $R_r = 0.016$ Ω , $L_r = 0.16$ H。DFIG 极对数 $p=3$,定子、转子互感 $L_m=2.8$ H。表 1 所示为 DFIG 参数的基准值。虚拟阻抗改进控制器中的虚拟电阻 R_v 和虚拟电感 L_v 取值范围需要满足的条件是: $U_r \leq U_{rmax}$,即机侧的转子电压要维持在系统稳定的最大值以下。

表 1 DFIG 参数的基准值

参数名称	基准值
功率 S/MW	9
电压 U/V	664
电流 I/A	9 036
阻抗 Z/ Ω	0.073
频率 f/Hz	60
角频率 ω /(rad·s ⁻¹)	376.8

使用电压跌落来模拟实际电网电压骤降,仿真中设定虚拟电阻为 5 p.u.、虚拟电感为 2.5 p.u.。图 5~图 7 为电网电压在 0.03 s 时突然减小 0.5 p.u.,并在 0.13 s 时回升到原值的仿真结果,分别对应初始状态、加入虚拟阻抗后及加入虚拟阻抗改进控制器后的 DFIG 模型,对比了不同状态下电网电压、定子三相电流、转子三相电流、电磁转矩 T_e 、有功功率及无功功率的仿真波形。

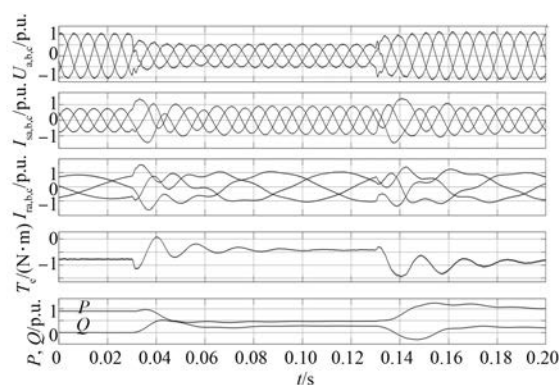


图5 初始状态 DFIG 模型仿真波形

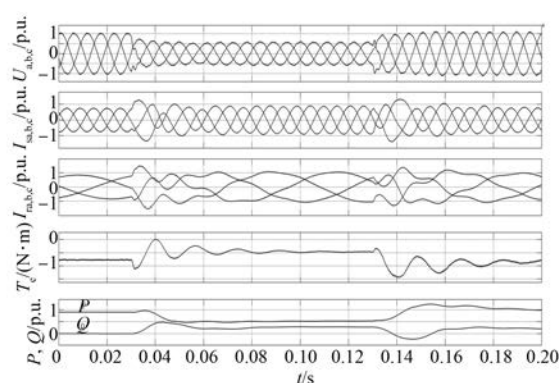


图6 加入虚拟阻抗后的 DFIG 模型仿真波形

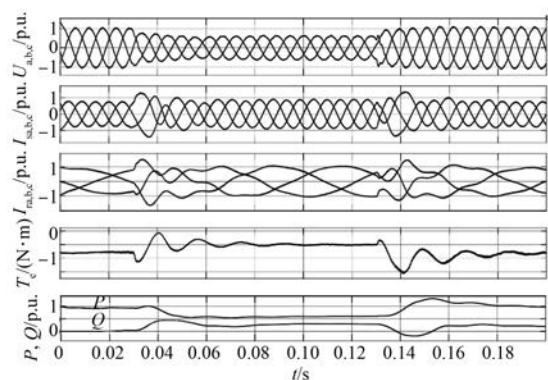


图7 加入虚拟阻抗改进控制器后的 DFIG 模型仿真波形

在 $0 \sim 0.04$ s 时间段内,对比图 5 和图 6,发现加入虚拟阻抗后,定子电流和转子三相电流波形的幅度有轻微减小。由图 7 可见,加入虚拟阻抗改进控制器后定子电流和转子三相电流波形起伏比起加入虚拟阻抗的波形更为稳定,无明显突变波动。在 DFIG 转子侧加入虚拟阻抗,图 6 中的电磁转矩波形无明显变化,但加入虚拟阻抗改进控制器后电磁转矩的振荡在短时间内得到轻微抑

制,并且在 0.04 s 可明显看到电磁转矩的减小。电磁转矩减小,相应地削弱了对机组轴系统的冲击,增强了系统的稳定性。在这一时间段,加入虚拟阻抗对定子电流的振荡有抑制作用,而虚拟阻抗改进控制器的抑制效果则更为明显。

$0.03 \sim 0.13$ s 内电网电压由 1 p.u. 降为 0.5 p.u.,无论是加入虚拟阻抗还是加入虚拟阻抗改进控制器,定子和转子电流波动的时间都有轻微的增长。加入改进控制器与加入虚拟阻抗相比,有功功率和无功功率的波形畸变程度有所降低,波动得到了一定的抑制,并且在 $0.04 \sim 0.06$ s 时间段内表现得尤为明显。加入改进控制器后的电磁转矩波形在 -0.5 N·m 附近轻微振荡并逐渐趋于稳定。

在 0.13 s 后,图 7 中加入虚拟阻抗改进控制器后的有功功率波形相比图 5 和图 6 都更趋近直线,确保了系统的稳定运行。

由图 5~图 7 的波形对比可知,采用虚拟阻抗改进控制策略,能够抑制定子三相电流、转子三相电流、电磁转矩、有功功率和无功功率的振荡。由此可以得出结论:使用虚拟阻抗改进控制器可使 DFIG 在电网电压骤变时全频段保持较好的抗干扰能力。

5 结 语

本文针对电网电压骤降故障时 DFIG 的控制技术进行了研究。基于 DFIG 电压跌落故障瞬间及稳态运行期间的数学模型,分析了已有的基于虚拟电阻的过电流抑制技术存在的缺点,指出已有的基于虚拟电阻的控制方法无法兼顾系统低电压故障穿越期间的过电流抑制性能及基频和高频性能。

为此,本文提出了基于虚拟阻抗技术的电网电压骤降故障时 DFIG 改进控制技术。该方法通过引入虚拟电感和虚拟电阻环节,在实现过电流抑制的同时,提升了高频性能,避免了对基频控制的影响,从而实现了过电流抑制方法的改进。

针对所提出的改进控制技术,本文进一步进行了结构优化和参数优化设计分析。通过引入前置滤波器,进一步降低了对基频电流控制的影响;通过虚拟阻抗参数分析,给出了兼顾过电流抑制和高频性能的参数设计思路。

【参考文献】

- [1] 刘其辉,贺益康,张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机的运行控制与建模仿真[J]. 中国电机工程学报,2006,26(5): 43.
- [2] 杨淑英,张兴,张崇巍,等. 电压跌落激起的双馈型风力发电机电磁过渡过程[J]. 电力系统自动化,2008,32(19): 85.
- [3] 苑国锋,柴建云,李永东. 变速恒频风力发电机组励磁变频器的研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(8): 90.
- [4] 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.
- [5] 徐海亮,章玮,贺益康,等. 双馈型风电机组低电压穿越技术要点及展望[J]. 电力系统自动化,2013,37(20): 8.
- [6] 姜惠兰,李天鹏,吴玉璋. 双馈风力发电机的综合低电压穿越策略[J]. 高电压技术,2017,43(6): 2062.
- [7] 程鹏,年珩,诸自强. 电网对称故障时双馈电机虚拟电阻控制技术[J]. 电机与控制学报,2014,18(6): 1.
- [8] 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.
- [9] 齐桓若,刘其辉. 双馈风机低电压穿越的改进技术[J]. 电网与清洁能源,2015,31(1): 102.
- [10] 谢震,张兴,杨淑英,等. 基于虚拟阻抗的双馈风力发电机高电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(27): 16.
- [11] FELTES C, FORTMANN J, ERLICH I, et al. High voltage ride-through of DFIG based wind turbines[C]

//Proceedings of 2008 IEEE Power Energy Society General Meeting,2008.

- [12] 林成武,王凤翔,姚兴佳. 变速恒频双馈风力发电机励磁控制技术[J]. 中国电机工程学报,2003,23(11): 122.
- [13] 吴国祥,黄建明,陈国呈,等. 变速恒频双馈风力发电运行综合控制策略[J]. 电机与控制学报,2008,12(4): 435.
- [14] 邵昊舒,王磊,蔡旭. 提高双馈风电机组 LVRT 能力的改进直接功率控制[J]. 电力自动化设备,2019,39(7): 15.
- [15] 孙丽玲,王艳娟. 双馈风力发电机高电压穿越暂态全过程分析及控制策略性能评估[J]. 高电压技术,2019,45(2): 593.
- [16] LIMA F K A, LUNA A, RODRIGUEZ P, et al. Rotor voltage dynamics in the doubly fed induction generator during grid faults [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2010,25(1): 118.
- [17] 谢震,张兴,宋海华,等. 电网电压骤升故障下双馈风力发电机变阻尼控制策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(3): 39.
- [18] PETERSSON A, HARNEFORS L, THIRINGER T. Evaluation of current control methods for wind turbines using doubly-fed induction machines [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(1): 227.
- [19] 程鹏. 双馈风电机组直接谐振与无锁相环运行控制研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.
- [20] SONG P, ZHANG Y, BAI K, et al. High voltage ride-through control method for DFIG-based wind turbines based on Resonant Controller[C]//2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy,2016: 61.

(上接第 55 页)

冷却结构、轴承冷却结构和高速转子结构的研究、设计。通过电磁、结构强度、流场、温度场仿真分析、样机试制及试验验证,结果表明电机各项性能满足 EMU 牵引电机技术要求。EMU 永磁电机的研制和装车应用,提高了中国 EMU 牵引电机的设计和制造水平,为中国铁路装备发展提供了技术支撑。

【参考文献】

- [1] 刘荣强,周国聘,姬春霞. 永磁电机在铁路机车牵引领域的应用[J]. 内燃机车,2008(5): 19.
- [2] 冯江华. 轨道交通永磁电机牵引系统关键技术及

发展趋势[J]. 机车电传动,2018(6): 9.

- [3] 屈斌,詹哲军,李霞. 高速列车永磁同步牵引系统研究与应用[J]. 电机与控制应用,2019,46(8): 87.
- [4] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1994.
- [5] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [6] 王秀和. 永磁电机[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [7] 贾喜勤,姬春霞,李彩霞,等. 香港电车永磁牵引电机设计[J]. 铁道机车与动车,2016(11): 1.