# 电网电压对称故障时 DFIG 转子电流的优化 控制策略

# 年珩,程鹏,诸自强

浙江大学电气工程学院 杭州 310027

摘要 为抑制电网电压对称故障时双馈感应风力发电机( DFIG)的转子过电流,本文在电 网电压对称故障时 DFIG 数学模型的基础上,分析了 DFIG 磁链自由分量引起的转子过电流机理,提出了一种以抑制转子电流自由分量为目标的 DFIG 优化控制策略。在转子电流基频分量闭环常规控制策略的基础上,加入了转子电流自由分量调节器,以构成 DFIG 电流优化控制系统,并分析了其对 DFIG 控制系统稳定性、动态特性的影响,进而给出了转子电流自由分量调节器参数的设计,增强了对转子电流自由分量的阻尼。最后,通过构建实验机组,对控制策略的有效性进行了实验验证。

**关键词:** 电网电压对称故障 双馈感应发电机 转子过电流 转子电流自由分量 不脱网运行

中图分类号: TM310

# Optimized Control Strategy of Rotor Current for Doubly Fed Induction Generators During Symmetrical Voltage Fault

Nian Heng, Cheng Peng, Ziqiang Zhu Zhejiang University Hangzhou 310027 China

Abstract In order to suppress the rotor overcurrent of doubly fed induction generator (DFIG) under the symmetrical voltage fault, an optimized rotor current control strategy aimed at restraining the free component of rotor current is proposed based on the DFIG mathematic model and the production principle of the flux free component. Another control loop for the free component of rotor current is added to the convenient current loop for suppressing the overcurrent caused by the voltage fault. Furthermore, on the basis of the DFIG's control model, the effects of the control system with the controller are analyzed. Taking the effects into account, the parameters of the controller can be designed and enhance the resisting disturbance ability of DFIG on the grid voltage fault. Finally, the DFIG experimental system is built, and the availability of the proposed current control strategy is validated by the experiment results.

**Keywords:** Symmetrical grid voltage fault, doubly fed induction generator, rotor over current, free component of rotor current, grid-connected operation

# 1 引言

可再生能源发电系统中,基于双馈感应发电机 (Doubly Fed Induction Generator, DFIG) 的风电机组因 其变流器容量小、功率解耦控制、成本较低等优势,成为变速恒频风力发电机组的主流机型 [1-3]。但由于

基金: 国家自然科学基金(51277159)和国家 863 高技术基金(2011AA050204)资助项目。

收稿日期 2013-04-20 改稿日期 2013-05-30

DFIG 定子与电网直接相连和变流器控制能力有限,在电网发生故障时 DFIG 机组易出现过电流、过电压等现象,危害变流器运行安全,继而引起风电机组的脱网 [4]。为此,许多国家提出了严格 的风电并网准则 [5,6],特别要求并网风电机组具有低电压穿越 (Low Voltage Ride Through, LVRT)能力。

目前,故障电网下 DFIG 运行控制技术已经成为国内外风电研究的主要方向 [7-22]。转子快速短 接(crowbar)技术由于其结构简单、控制容易等优势,已成为电网发生故障时保护 DFIG 转子侧变流器(Rotor Side Converter, RSC)的主要措施 [7,8]。电网发生故障时利用 Crowbar 将 RSC 旁路,可避免转 子绕组过电流对 RSC 的损坏,此时 DFIG 类似于一台并网运行的笼型电机,需要消耗大量的无功功率,不利于电网故障状态的恢复。文献 [9]利用网侧变流器(Grid Side Converter, GSC)作为无功输出源,短时补偿 DFIG 机组消耗的无功功率,进而协助电网电压的恢复。此外,也可采用直流斩波电阻 (chopper)[10]、定转子串联阻抗[11,12]、电压动态恢复器(DVR)[13]、静止同步补偿器(STATCOM)[14]和串联网侧变换器 [15]等方法实现电网故障时风电机组的穿越运行。这些方法均需增加硬件保护装置,并提高了系统的成本与控制的复杂性。因此,如何通过改进 RSC 的控制策略,以抑制电网故障引起转子电流冲击是实现 DFIG 机组不间断运行的关键。

电网电压发生故障会引起 DFIG 磁链自由振荡 [16],使转子电流在原有转差频率分量的基础上叠加了与电网电压故障相关的自由分量,导致转子出 现过电流,这是引起 DFIG 变流器脱网的主要原因。文献 [17,18]通过修改避免了 DFIG 定、转子绕组出现过电流。文献 [19]提出了一种以定、转子漏磁场来抵消定子磁链自由分量和负序分量的灭磁控制技术, 但该控制技术需要较大容量的变流器。 文献 [20]采用虚拟阻抗与灭磁控制相结合的方案,拓展了 RSC 在电网电压故障时安全运行区间。文献 [21]利用磁链有源衰减技术,加快了 DFIG 磁链的衰减。文献 [22]利用前馈补偿改善了电网电压故障时 DFIG 的暂态过程,但其不足在于DFIG 转子电流、电磁转矩的长时间振荡。文献 [19-22]中均含有磁链分离与提取环节,需准确知道DFIG 漏感等参数,其控制性能易受电机运行工况影响。

为了抑制电网电压对称故障时 DFIG 转子电流的振荡冲击,本文通过分析转子电流振荡的产生机理,提出了一种以限制电网故障时转子电流自由分量为目标的优化控制策略。该优化控制策略在抑制转子电流冲击的同时,能有效缩短电网故障引起的 DFIG 动态过渡过程,并对该控制策略在电网对称故障下的稳定性进行了理论分析。最后,通过构建 DFIG 实验机组,对所提策略的有效性进行了实验验证。

# 2 电网故障下的 DFIG 动态性能

考虑到实际电网中大功率设备起动、电网短路故障等产生的电压骤变,为研究电网电压故障时 DFIG 转子电流的优化控制策略,须在 DFIG 数学模型基础上分析电网故障时 DFIG 的动态性能。

## 2.1 DFIG 数学模型

在两相同步旋转 d-q 坐标系中, DFIG 等效电路如图 1 所示。

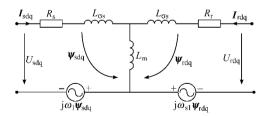


图 1 两相同步旋转 d-q 下 DFIG 的 T 型等效电路

Fig.1 T-representation of DFIG equivalent circuit in the synchronous frame

定、转子磁链方程可以表示为

$$\psi_{\rm sdq} = L_{\rm s} I_{\rm sdq} + L_{\rm m} I_{\rm rdq} \tag{1}$$

$$\psi_{\rm rdg} = L_{\rm r} I_{\rm rdg} + L_{\rm m} I_{\rm sdg} \tag{2}$$

土  $\psi_{\text{sdg}}$ ,  $\psi_{\text{rdg}}$ ——定、转子磁链矢量;

 $I_{
m sdq}$ , $I_{
m rdq}$ ——定、转子电流矢量;  $L_{
m s}$ , $L_{
m r}$ ——定、转子绕组全自感,

 $L_s = L_m + L_{\sigma s}$ ,  $L_r = L_m + L_{\sigma r}$ ;

 $L_{\rm m}$ ,  $L_{\rm \sigma s}$ ,  $L_{\rm \sigma r}$ —定转子之间的互感、定子漏感 和转子漏感。

定、转子电压方程可以表示为

$$U_{\text{sdq}} = R_{\text{s}} I_{\text{sdq}} + \frac{\mathrm{d} \psi_{\text{sdq}}}{\mathrm{d} t} + \mathrm{j} \omega_{\text{l}} \psi_{\text{sdq}}$$
 (3)

$$U_{\rm rdq} = R_{\rm r} I_{\rm rdq} + \frac{\mathrm{d} \psi_{\rm rdq}}{\mathrm{d} t} + \mathrm{j} \omega_{\rm sl} \psi_{\rm rdq} \tag{4}$$

式中  $R_s$ ,  $R_r$ ——定、转子电阻;

 $U_{\mathrm{sdq}}$ , $U_{\mathrm{rdq}}$ 一定转子电压矢量;

 $\omega_1$ ——同步角频率:

 $\omega_{sl}$ —转差角频率, $\omega_{sl}=\omega_{l}-\omega_{r}$ ;

 $\omega_r$  一转子角频率。

以上转子各分量均折算至定子侧。

由式(1)~式(4),转子电压表达式可以写为

$$U_{\text{rdq}} = \frac{L_{\text{m}}}{L_{\text{e}}} \left( \frac{d}{dt} + j\omega_{\text{sl}} \right) \psi_{\text{sdq}} + \left( R_{\text{r}} + \sigma L_{\text{r}} \left( \frac{d}{dt} + j\omega_{\text{sl}} \right) \right) I_{\text{rdq}}$$
 (5)

式中  $\sigma$ ——漏磁系数,  $\sigma$ =1-L2 m/ $L_sL_r$ 。

可以看出式(5)中,转子电压由两部分组成:第一项是定子磁链在转子绕组中产生的感应电动势,记 作  $E_{rdg}$ ; 第二项为转子电流在转子绕组阻抗上形成的压降。

#### 2.2 电网故障下 DFIG 运行性能

由于文献[16]已建立了电网电压故障发生瞬间 DFIG 的动态模型,因此,本文仅对电网故障瞬时 DFIG 的数学模型给出简要阐述与说明。

假定在  $t_0$ 时刻电网电压发生对称故障,其故障程度为 p,则电网电压可表示为

$$U_{\text{sdq}} = \begin{cases} U & t < t_0 \\ (1-p)U & t \ge t_0 \end{cases}$$
 (6)

式(6)中,p>0表示电网电压发生对称骤降故障,p<0表示电网电压发生对称骤升故障,则电网电 压故障时转子感应电动势可近似表示为

$$\boldsymbol{E}_{\text{rdq}} = \boldsymbol{E}_{\text{rdq-f}} + \boldsymbol{E}_{\text{rdq-n}}$$
$$\approx L_{\text{m}} / L_{\text{s}} \, s(1-p)U -$$

$$L_{\rm m}/L_{\rm s} (1-s) p U e^{-(t-t_0)/\tau_{\rm s}} e^{-j\omega_{\rm l}(t-t_0)}$$
 (7)

由式(7)可以看出, 电网电压故障时 DFIG 转子电动势由两部分构成: 其中第一项为定子磁链强制分 量感应产生的转子电动势强制分量,记作  $E_{rdq-f}$ , 其在两相同步旋转 dq 坐标系下表现为直流量形式; 第二 项称为定子磁链自由分量感应产生的转子电动势自由分量,记作  $E_{rdq-n}$ , 其在两相同步旋转 dq 坐标系下表 现为 50Hz 交流量形式。

当电网电压发生故障时 RSC 如果无法输出与  $E_{rdq}$  相匹配的转子电压,转子绕组中就会出现幅值较大的电流自由振荡分量,造成 RSC 过电流保护动作而导致风机脱网。因此,在电网电压故障期间,如何有效抑制 DFIG 转子电流的自由分量,是实现 DFIG 故障穿越运行的关键。

# 3 转子电流优化控制策略

为实现 DFIG 故障穿越运行,大多文献 [19-21]集中于研究定子磁链波动的抑制技术,这需要准确测量电机漏感参数,其控制效果易受电机工作状态的影响。针对这一问题,本文提出了一种转子电流优化控制策略,通过在转子电流基频分量闭环的基础上加入直接控制转子电流自由分量的调节器,以抑制电网电压对称故障期间转子电流的振荡冲击,缩短 DFIG 系统过渡过程时间。

## 3.1 转子电流优化控制策略设计

图 2为 DFIG 转子电流优化控制框图,其中实线框内表示转子电流自由分量调节器。可以看出,所提控制策略包含两个电流闭环:

- (1)转子电流基频分量闭环调节,用以控制 DFIG 输出的有功功率和无功功率,实现风电机组的最大风能追踪运行。
  - (2) 转子电流自由分量闭环调节,用以抑制电网电压故障时转子电流的振荡冲击。

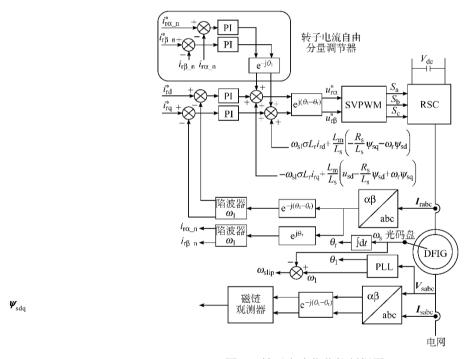


图 2 转子电流优化控制框图

Fig.2 Block diagram of the optimal control of rotor current

本文所提改进控制策略是在原来转子电流基频分量闭环的基础上添加了转子电流自由分量闭环调节器,由于 RSC 的两个电流调节器始终处于工作状态,故无需判断电网是否故障以切换不同的控制策略,即可实现理想电网和故障电网下 DFIG 控制策略的无缝切换。此外,该方法无需定子磁链分离与提取环节,对电机参数依赖性小,计算简单,易于工程实现。

电网电压故障后转子电流中存在基频分量和自由分量,可以分别通过频率为  $\omega_1$  的陷波器加以提取,以得到两相同步旋转 dq 坐标系下的转子电流基频分量 ird、irq,以及两相定子静止  $\alpha\beta$  坐标系下的转子电流自由分量 iro\_n、ir $\beta$ \_n,由于均表现为直流量,可分别通过 PI 调节器加以控制。由于需要抑制转子电流自由分量 iro\_n、ir $\beta$ \_n,可设定转子电流自由分量 $\delta$ 考值 iro\_n、ir $\beta$ \_n,可设定转子电流自由分量 $\delta$ 

最终可获得两相同步旋转 dq 坐标系下转子电压参考值

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{rdq}}^{*} = \boldsymbol{U}_{\mathrm{rdq-PI}} + \boldsymbol{U}_{\mathrm{rdq-C}} + \boldsymbol{U}_{\mathrm{rdq-n}}$$
 (8)

转子电压参考值由三部分构成: Urdq-PI 为转子电流基频分量调节器输出, Urdq-n 为转子电流自由分 量调节器输出,Urdq-C 为耦合项。将转子电压参考值 Urdq 经过坐标变换后可得在两相转子静止坐标系下 转子电压参考值  $u_{T\alpha}^*$ 、 $u_{T\beta}^*$ ,然后将该转子电压参考值经过 SVPWM 调制,实现对 DFIG 电机运行状态的 控制。

#### 3.2 转子电流优化控制策略分析

根据上节分析可知,转子电流优化控制策略包含两个电流调节器, 图 3为 DFIG 控制系统框图,图中 实线框表示转子电流自由分量调节器,这里通过低通传递函数实现对理想积分器的替代 [23]。其中

$$\begin{cases} G_{p}(s) = \frac{1}{R_{r} + \sigma L_{r}s} \\ G_{1}(s) = \frac{L_{m}}{L_{s}} \left( s + j\omega_{s1} \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} G_{PII}(s) = k_{p1} + \frac{k_{i1}\omega_{c}}{s + \omega_{c}} \\ G_{PI2}(s) = k_{p2} + \frac{k_{i2}\omega_{c}}{s + \omega_{c}} \end{cases}$$

$$(9)$$

$$\begin{cases} G_{\text{PII}}(s) = k_{\text{pl}} + \frac{k_{\text{il}}\omega_{\text{c}}}{s + \omega_{\text{c}}} \\ G_{\text{PI2}}(s) = k_{\text{p2}} + \frac{k_{\text{i2}}\omega_{\text{c}}}{s + \omega_{\text{c}}} \end{cases}$$
(10)

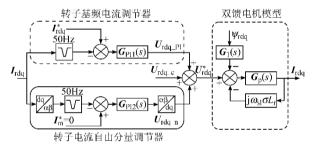


图 3 DFIG 转子电流控制框图

Fig.3 Rotor current control diagram of the DFIG

此时,实际转子电流的传递函数可以表示为

$$\boldsymbol{I}_{\text{rdq}}(s) = G_{\text{rr}}(s)\boldsymbol{I}_{\text{rdq}}^{*}(s) - G_{\text{sr}}(s)\boldsymbol{\psi}_{\text{sdq}}(s)$$
 (11)

$$G_{\rm rr}(s) = \frac{I_{\rm rdq}}{I_{\rm rdq}^*} = \frac{F_1(s)G_{\rm p}(s)}{1 + F_1(s)G_{\rm p}(s) + F_2(s)G_{\rm p}(s)}$$
(12)

$$G_{\rm sr}(s) = \frac{I_{\rm rdq}}{\psi_{\rm sdq}} = \frac{G_1(s)G_{\rm p}(s)}{1 + F_1(s)G_{\rm p}(s) + F_2(s)G_{\rm p}(s)}$$
(13)

式中, $G_{rr}(s)$  为转子电流闭环传递函数;  $G_{sr}(s)$  为定子磁链闭环传递函数,其闭环传递函数表达式为 式中;  $F_1(s)$ 、 $F_2(s)$  分别为在两相同步旋转 dq 坐标系中转子基频、自由分量电流调节器传递函数,如式 (14)、式(15)所示。

其中,低通传递函数截止频率  $\omega_{\epsilon}=10$ rad/s, $\epsilon$ 为陷波器衰减系数,实际系统中考虑到滤波效果与系统稳 定性,一般 $\xi = 0.707$ 。

$$F_{1}(s) = \frac{\left(k_{p1}s + \omega_{c}k_{p1} + \omega_{c}k_{i1}\right)\left(s^{2} + \omega_{l}^{2}\right)}{\left(s + \omega_{c}\right)\left(s^{2} + 2\xi\omega_{l}s + \omega_{l}^{2}\right)}$$
(14)

$$F_2(s) = \frac{s^4 + 6\omega_0^2 s^2 + \omega_0^4}{s^2 + 2\xi\omega_1 s + \omega_1^2} \bullet$$

$$\frac{k_{p2}s^2 + 2k_{p2}\xi\omega_1 s + k_{p2}\omega_1^2 + \omega_c k_{i2}}{s^4 + 6\omega_0^2 s^2 + 4\omega_1^2\omega_c s + \omega_0^4}$$
(15)

由式(12)、式(13)可知,转子电流调节器特征方程为  $\Delta$ =1+ $F_1(s)G_P(s)$ + $F_2(s)G_P(s)$ ,此时控制系统的 开环增益 F(s) 可以表示为

$$F(s) = F_1(s)G_p(s) + F_2(s)G_p(s)$$
 (16)

采用转子电流自由分量的控制方案中,其转子电流基频分量 PI 调节器参数  $k_{p1}$ 、 $k_{i1}$  可以遵循常规 PI 调节器的设计,兼顾稳态性能以及动态特性等控制系统指标  $[^{23}]$ ,下面着重论述其转子电流自由分量 PI 调节器参数设计与选择。

为分析采用转子电流自由分量闭环调节环节对 DFIG 控制系统稳定性的影响,需分析 图 4、图 5所给 出的不同  $k_{p2}$ 、 $k_{i2}$ 下开环传递函数 F(s) 频率响应。通过图 4、图 5 可以看出在 50Hz 频率处出现相位 的跳变,故会造成控制系统的相位裕量减小。图 4 为转子自由电流调节器比例系数  $k_{p2}$ 增加时 F(s) 的 Bode 图,其中  $k_{i2}$ =500。当  $k_{p2}$ =1、 $k_{p2}$ =5、 $k_{p2}$ =10 时,控制系统的相位裕度分别为 47°、59°、73°。可见:随着转子自由电流调节器的比例系数  $k_{p2}$ 增加,在 50Hz 处的控制增益几乎不变,但系统的相位裕度增大。 图 5为转子自由电流调节器积分系数  $k_{i2}$ 增加时 F(s) 的 Bode 图,其中  $k_{p2}$ =5。当  $k_{i2}$ =100、 $k_{i2}$ =500、 $k_{i2}$ =1 000 时,控制系统的相位裕度分别为 77°、59°、45°。可见:随着转子自由电流调节器的积分系数  $k_{i2}$ 增加,在 50Hz 处的控制增益增加,但系统的相位裕度减小。通过上述分析可知,  $k_{p2}$ 、 $k_{i2}$ 的选取要兼顾系统的稳定性以及控制增益两方面内容。故针对表所示的 DFIG 电机系统,采用转子电流自由分量闭环调节器的优化控制方案下其参数为  $k_{p1}$ =12、 $k_{i1}$ =800、 $k_{p2}$ =5、 $k_{i2}$ =500。

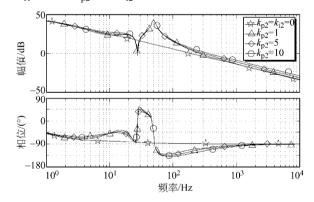


图 4 开环传递函数 F(s) 频率响应( $k_{i2}$ =500)

Fig.4 Frequency response of the open-loop F(s) ( $k_{12}$ =500)

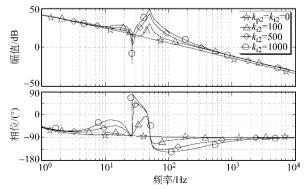


图 5 开环传递函数 F(s) 频率响应( $k_{n2}=5$ )

Fig.5 Frequency response of the open-loop F(s) ( $k_{p2}=5$ )

为了分析采用转子电流自由分量调节器的优化控制方案下转子电流对定子磁链抗磁链扰动能力,将式(13)写成标量的形式,则有

$$|G_{\text{sr1}}(s)| = \left| \frac{I_{\text{rd}}}{\psi_{\text{sd}}} \right| = \left| \frac{I_{\text{rq}}}{\psi_{\text{sq}}} \right| = \left| \frac{G_{11}(s)G_{\text{p}}(s)}{1 + F_{1}(s)G_{\text{p}}(s) + F_{2}(s)G_{\text{p}}(s)} \right|$$

(17)

$$|G_{\text{sr}2}(s)| = \left| \frac{I_{\text{rd}}}{\psi_{\text{sq}}} \right| = \left| \frac{I_{\text{rq}}}{\psi_{\text{sd}}} \right| = \left| \frac{G_{12}(s)G_{\text{p}}(s)}{1 + F_{1}(s)G_{\text{p}}(s) + F_{2}(s)G_{\text{p}}(s)} \right|$$

(18)

式中,  $G_{sr1}(s)$  表示定子磁链 d 轴、q 轴分量对转子电流 d 轴、q 轴分量的影响;  $G_{sr2}(s)$  表示定子磁链 q 轴、d 轴分量对转子电流 d 轴、q 轴分量的影响;  $G_{11}(s)=sL_m/L_s$ ,  $G_{12}(s)=\omega_{slip}$ 。

图 6a 和 6b 分别给出了采用转子电流自由分量 调节器前后  $G_{sr1}(s)$  和  $G_{sr2}(s)$  的幅频特性。采用转子电流自由分量闭环调节器的优化控制方案时, DFIG 控制系统对由于电网对称故障所引起的定子磁链 50Hz 振荡的衰减率分别为 -3.6dB、-7.3dB,而未采用转子电流自由分量闭环调节器时其衰减率分别为 27.6dB、23.8dB。采用转子电流自由分量闭环调 节器后 DFIG 控制系统抗定子磁链扰动能力显著增 强,这意味着由于电网电压故障所引起的定子磁 链 50Hz 波动对 DFIG 控制系统的影响将得到明显抑制。

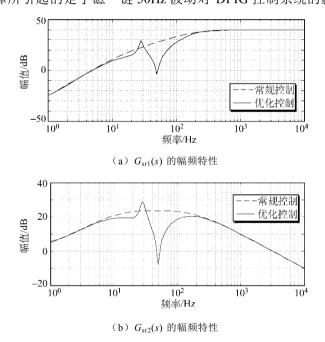


图 6 转子电流抗定子磁链扰动能力分析

Fig.6 Rotor current sensitivity to the flux oscillation using conventional and optimal control

# 4 实验验证

为了验证所提出的转子电流优化控制策略的有效性,搭建了 1kW 双馈感应风力发电系统实验平台 (见图 7),实验系统参数见下表。

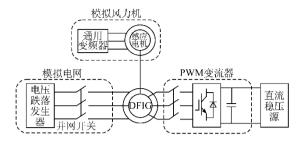


图 7 DFIG 实验机组框图

Fig.7 The hardware structure diagram of the power and control circuit for DFIG experiment bench

#### 表 实验系统参数

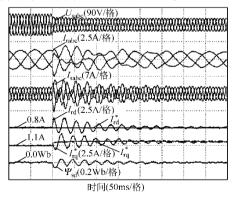
Tab. Parameters of experiment DFIG system

参 数	数值	参数	数 值
额定功率/kW	1	电感 $L_{ m m}/{ m mH}$	87.5
定子电压/V	110	定子漏感 $L_{\sigma s}/mH$	5.6
母线电压/V	200	定子电阻 $R_{\rm s}/\Omega$	1.01
定转子匝比	0.33	转子漏感 $L_{\sigma r}/mH$	5.6
极对数	3	转子电阻 $R_{\rm r}/\Omega$	0.88

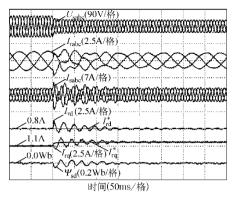
该平台主要由三个部分构成:风力机模拟部分、DFIG及RSC变流器部分、电网电压模拟器。其中,在该实验平台中,利用一台变频器驱动的三相感应电机模拟风力机;通过直流源为RSC提供直流侧电压以及转差功率,为模拟实际电网的故障,采用基于电力电子变换形式的电压故障发生器构成电网模拟器。实验系统中采用TI公司TMS320F2812。IGBT驱动器采用SEMIKRON公司SKHI61驱动模块。DFIG机组实验波形是通过YOKOGAWADL750进行采集。

实验中,DFIG 处于额定电压工作状态,且定子输出的有功、无功功率分别为 0.3 pu、0 pu。由于风力机惯性时间常数较大、电网故障时间较短的缘故,故可近似认为 DFIG 转速在电网故障期间保持不变。在实验中,DFIG 转速设定为 800r/min; RSC 电流保护值 1.5 pu(3.5A)。

图 8 为电网电压骤降 40%时 DFIG 系统实验 结果,其中图 8a 表示未采用转子电流自由分量闭环 调节器的常规控制方案时 DFIG 的波形,图 8b 表示采用转子电流自由分量闭环调节器的优化控制方案时 DFIG 的波形。可以看出,采用转子电流优化控制方案后电网电压骤降所造成的转子电流冲击为 2.1A,为采用常规控制方案时转子冲击电流的 83%;转子故障电流在 160ms 内完成衰减振荡,相比常规 控制方案缩短了 70ms,同时定子磁链振荡时间也缩短了约 60ms。因此,说明采用转子电流自由分量闭环调节器的优化控制方案可有效抑制电网电压骤降导致的转子电流冲击与振荡。



(a) 常规控制方案下 DFIG 动态特性



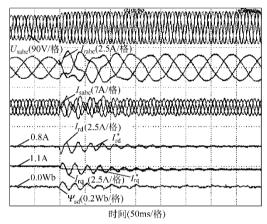
(b) 优化控制方案下 DFIG 动态特性

图 8 电网电压骤降 40%时 DFIG 实验结果 (s=0.2)

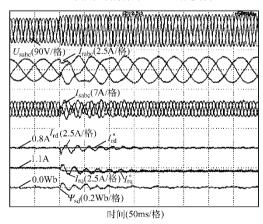
Fig.8 Experiment results of the DFIG for

a 40% voltage dip (*s*=0.2)

图 9 为电网电压骤升 30%时 DFIG 系统实验结果,其中图 9a 表示未采用转子电流自由分量闭环 调节器的常规控制方案时 DFIG 的波形,图 9b 表示采用转子电流自由分量闭环调节器的优化控制方案时 DFIG 的波形。通过对比可知,采用转子电流优



(a) 常规控制方案下 DFIG 动态特性



(b) 优化控制方案下 DFIG 动态特性

图 9 电压骤升 30%时 DFIG 实验结果 (s=0.2)

Fig.9 Experiment results of the DFIG for

a 30% voltage swell (s=0.2)

化控制方案后电网电压骤升所造成的转子电流冲击为 1.8A,为采用常规控制方案时转子电流冲击的 86%;转子电流自由分量在 150ms 内完成衰减,相比于常规控制方案缩短了 50ms,同时定子磁链过渡时

间缩短了约 50ms。因此,说明采用转子电流自由分量闭环调节器的优化控制方案可有效限制电网电压骤升导致的转子电流冲击与振荡,有助于 DFIG 机组的稳定不脱网运行。

图 10 对比了不同电网电压故障深度下 DFIG 在采用常规转子电流控制方案和优化转子电流控制方案时转子电流冲击峰值和振荡时间。可以看出,随着电网电压骤降 (或骤升)深度的增加,转子电流冲击峰值增大,且振荡时间变长。这是由于电网电压故障所引起的定子磁链直流分量增加,导致转子绕组中感应产生的转子电流也随之增加。与采用常规转子电流控制方案相比,采用转子电流优化控制方案可以有效抑制由电网电压故障所引起的转子过电流,并缩短了转子电流过渡过程时间。这主要是由于优化转子电流控制方案包含对转子电流自由分量的闭环调节,可实现对转子电流自由分量的抑制。

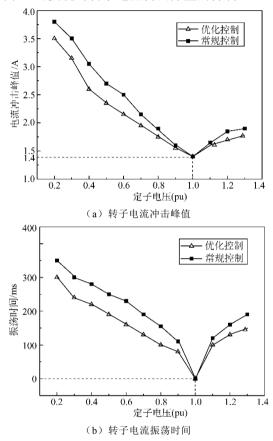


图 10 电网电压故障程度不同时 DFIG 实验结果 Fig.10 Experiment results of the DFIG for various grid voltage fault

为了验证转子电流优化控制方案对 DFIG 故障穿越能力的提升,图 11 对比了不同转差角频率下 DFIG 安全运行区间,其中区域 A 表示在未采用转子电流自由分量闭环调节器的常规控制方案时 DFIG 的安全运行区间,区域 A 和区域 B 共同表示采用转子电流自由分量闭环调节器的优化控制方案时 DFIG 安全运行区间,深色区域表示 DFIG 非安全运行区间,需额外采用其他措施(如 Crowbar等)方可实现 DFIG 不脱网运行。可以看出,与转子电流常规控制方案相对比,采用转子电流优化控制方案后 DFIG 安全运行区间得以拓宽,DFIG 的不脱网运行能力得以增强。此外,随着电机转速的提高, DFIG 安全运行区间缩小。这是由于随着转差率的降低电网电压故障所引起的感应电动势越大,进而会产生较 大的转子电流冲击,使得 DFIG 安全运行区间缩小。

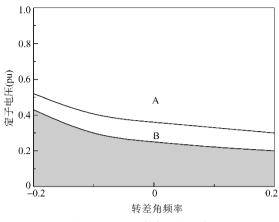


图 11 DFIG 安全运行区间

Fig.11 DFIG feasibility regions

综上可知,采用转子电流自由分量闭环调节器的优化控制方案可以抑制由于电网电压对称故障所引起的转子电流振荡冲击,缩短了转子电流过渡时间,拓展了 DFIG 安全运行区间。此外,所提出的优化控制方案是以限制转子电流自由分量为目标, 因此本文所提方法无需检测电网电压故障状态。而且,本文所提方法不仅可以作为一种独立的 DFIG 故障穿越控制方案,还可与其他故障运行控制技术相结合以改善DFIG 在电网对称故障时运行特性的控制方案。

# 5 结论

本文通过对电网电压对称故障时转子电流振荡冲击产生机制的论述,构造了一种以抑制转子电流自由分量为目标的优化控制方案,该控制方案无需电网故障状态检测即可实现 DFIG 控制策略切换,同时无需定子磁链分离与提取环节,可有效提高电网故障时 DFIG 电流的动态控制性能。理论分析与实验结果表明,所提出的转子电流优化控制策略能有效抑制由于电网电压对称故障所产生转子电流冲击,缩短 DFIG 过渡过程时间,拓展 DFIG 安全运行区间,从而增强电网电压对称故障时 DFIG 不脱网运行能力。

#### 参考文献

- [1] 刘其辉,贺益康,张建华.交流励磁变速恒频双馈型异步发电机的稳态功率关系 [J]. 电工技术学报,2006,21(2): 39-44.
  - Liu Qihui, He Yikang, Zhang Jianhua. Steady-state power relation of AC-excited variable-speedconstant- frequency doubly-fed induction generator[J]. Transac- tions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(2): 39-44.
- [2] 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研究 [J]. 中国电机工程学报,2003,23(11):122-125.
  - Lin Chengwu, Wang Fengxiang, Yao Xingjia. Study on excitation control of VSCF doubly fed wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 122-125.
- [3] 贺益康, 周鹏. 变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 140-146. He Yikang, Zhou Peng. Overview of the low voltage ride-through technology for variable speed constant frequency doubly fed wind power generation systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 140-146.
- [4] 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): 1-15. He Yikang, Hu Jiabing. Several hot-spot issues associated with the grid-connect operations of wind-turbines driven doubly fed induction generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(27): 1-15.
- [5] 国家电网公司. Q/GDW392-2009 风电场接入电网技术规定 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [6] NetzGmbh E ON. Grid Code. Germany. Available: http://www.nerc.com/docs/pc/ivgtf/German\_EON\_

- Grid Code.pdf.
- [7] Morren J, de Haan S W H. Ridethrough of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(2): 435-441.
- [8] Hansen A D, Michalke G. Fault ridethrough capability of DFIG wind turbines[J]. Renewable Energy, 2007, 32(9): 1594-1610.
- [9] 胡家兵, 贺益康. 双馈风力发电系统的低压穿越运行与控制 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 49-52. Hu Jiabing, He Yikang. Low voltage ride through operation and control of doubly fed induction generator wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 49-52.
- [10] Martinez J, Kjaer P C, Rodriguez P, et al. Parameterization of a synchronous generator to represent a doubly fed induction generator with chopper protection for fault studies[J]. Wind Energy, 2011, 14(1): 107-118.
- [11] Yan X, Venkataramanan G, Wang Y, et al. Grid-fault tolerant operation of a DFIG wind turbine generator using a passive resistance network[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(10): 2896-2905.
- [12] Yang J, Fletcher J E, O'reilly J. A series dynamic resistorbased converter protection scheme for doubly- fed induction generator during various fault conditions [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 422-432.
- [13] Cheng P, Nian H. An improved control strategy for DFIG system and dynamic voltage restorer under grid voltage dip[C]. 21st IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Hangzhou, China, 2012: 1868-1873.
- [14] Qiao W, Venayagamoorthy G K, Harley R G. Real- time implementation of a statcom on a wind farm equipped with doubly fed induction generators[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(1): 98-107.
- [15] 廖勇, 李辉, 姚骏, 等. 采用串联网侧变换器的双馈风电机组低电压过渡控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(37): 90-98.

  Liao Yong, Li Hu, Yao Jun, et al. Low voltage ride-through control strategy of a doubly fed induction generator wind turbine with series grid-side converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(37): 90-98.
- [16] Lopez J, Sanchis P, Roboam X, et al. Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(3): 709-717.
- [17] 姚骏, 廖勇, 唐建平. 电网短路故障时交流励磁风力发电机不脱网运行的励磁控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(30): 64-71.

  Yao Jun, Liao Yong, Tang Jianping. Ride-through control strategy of AC excited wind-power generator for grid short
  - circuit fault [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(30): 64-71.
- [18] Lima F K A, Luna A, Member S, et al. Rotor voltage dynamics in the doubly fed induction generator during grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(1): 118-130.
- [19] Xiang D, Ran L, Tavner PJ, et al. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 652-662.
- [20] Hu S, Lin X, Kang Y, et al. An improved low-voltage ride-through control strategy of doubly fed induction generator during grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 3653-3665.
- [21] 张禄, 金新民, 战亮宇, 等. 电网电压对称跌落下的双馈感应风力发电机磁链有源衰减控制 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 191-197.
  - Zhang Lu, Jin Xinmin, Zhan Liangyu, et al. Flux active damping control of the doubly fed induction generator under grid voltage symmetrical dip[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 191-197.
- [22] Liang J, Qiao W, Harley R G. Feed-forward transient current control for low voltage ride through enhance- ment of DFIG wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(3): 836-43.
- [23] Zmood D N, Holmes D G. Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 814-822.