

# PI 控制参数对双馈风电机组短路电流特性的影响分析

郑 涛<sup>1</sup>, 魏旭辉<sup>1</sup>, 李 娟<sup>1</sup>, 李 菁<sup>1</sup>, 王燕萍<sup>1</sup>, 杨国生<sup>2</sup>, 王增平<sup>1</sup>, 李 霞<sup>3</sup>

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 3. 国网冀北电力有限公司承德电力经济研究所, 河北 承德 067000)

**摘要:** 在机端电压跌落程度不深的情况下, 双馈风电机组(DFIG)不投入撬棒, 而是通过改变转子侧控制策略的方法抑制转子侧过电流, 此时定子短路电流中会产生衰减暂态电流分量, 而 DFIG 控制系统的 PI 参数是影响该衰减暂态电流分量的主要因素。以机端发生对称故障的情况为例, 针对机端电压跌落程度不深时撬棒保护未投入的情况, 推导了 DFIG 短路电流的表达式, 从理论上分析了 PI 参数对其短路电流特性的影响, 并且辅以 PSCAD 仿真验证分析了在机端电压跌落轻微的情况下 DFIG 的短路电流特性。

**关键词:** 双馈风电机组; 风电; 对称故障; 转子侧变频器; 定子电流; 短路电流; PI 参数; 仿真

**中图分类号:** TM 614

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.07.003

## 0 引言

双馈风电机组(DFIG)发电效率高、功率变频器容量小、投资少,能够在较宽的范围内进行变速运行,并且可以通过有功、无功的解耦控制调节功率因数,目前已经被广泛应用于风力发电领域<sup>[1]</sup>。由于 DFIG 转子侧通过交-直-交变频器与电网相连,且变频器的容量较小(通常只有风机容量的 30%),风机外故障时会导致串接在转子回路的变频器易过流、直流母线会因电容充电而过压,严重时损坏变频器甚至造成风电机组脱网运行。为了保证 DFIG 风电系统的安全运行,目前较多的保护措施是增加额外的硬件电路,释放暂态过程中的能量,如撬棒保护电路。撬棒投入后双馈风力发电机类似于异步发电机,该保护措施下 DFIG 短路电流特性的研究已经十分深入<sup>[2-6]</sup>。但是当转子过电流不足以使转子侧投入撬棒保护电路,而是继续连接转子变频器时,可充分发挥变频器的既定容量,采用 PI 控制器来调整转子励磁电压,或是采用改进的控制策略调整故障期间的定子电流<sup>[7-9]</sup>。文献[10]为抑制电网电压对称故障时 DFIG 的转子过电流提出了以抑制转子电流自由分量为目标的 DFIG 优化控制策略。文献[11]表明采用改进的变频器控制策略可使双馈风电系统承受 15% 的定子电压骤降而不停止运行。此时,DFIG 的短路电流特性会发生较明显的变化。

目前,在计及 PI 控制的前提下对 DFIG 短路特性开展的研究并不多见。文献[12]分析短路时定子电流解析式中的各分量及其变化规律,给出了 DFIG 三相短路过程中的定子电流的解析解。文献[13]提出由于故障点位置不同会造成转子励磁特性发生变

化,并针对远端故障的情况分析了励磁变频器控制参数对 DFIG 短路电流特性的影响,对仿真波形进行了比较分析;文献[14]推导了电网对称短路和不对称短路时的转子电流表达式,仅初步采用数学解析的方法给出了故障后转子电流表达式。文献[15]考虑转子侧变流器控制系统的不同设计方法,得到了计及励磁调节特性影响时转子绕组故障电流的简化计算模型。上述研究侧重于分析转子侧故障电流,并未深入研究 PI 控制参数对 DFIG 定子电流的影响。

本文以对称故障为例,针对机端电压跌落程度不深时撬棒未投入的情况,考虑控制作用下 DFIG 转子侧 PI 控制参数对定子短路电流的影响。采用空间矢量法和坐标变换方法,通过 DFIG 数学模型中的转子电压、磁链方程,推导出故障后转子回路开路电压的变化规律,联立转子侧变频器电压控制方程,采用数学解析的方法推导了故障发生后转子侧变频器不闭锁的情况下定子电流的解析表达式,并给出了考虑 RSC 变流器容量限制情况下,转子电流参考值的选取方法,进一步分析了转子侧变频器的 PI 控制参数对 DFIG 短路电流的影响。最后,通过在 PSCAD/EMTDC 中搭建的 DFIG 模型进行仿真测试,验证了所推导的短路电流解析表达式的有效性。本文从继电保护的角度,关注机组故障下的外特性,服务于 DFIG 故障分析和保护整定。

## 1 DFIG 矢量模型

考虑到研究的暂态过程很短暂,定、转子均采用电动机惯例,在电网电压同步旋转坐标系 SRF(Synchronous Rotating Frame)下,DFIG 的矢量模型为<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} u_s = R_s i_s + d\psi_s + j\omega_1 \psi_s \\ u_r = R_r i_r + d\psi_r + j\omega_s \psi_r \\ \psi_s = L_s i_s + L_m i_r \\ \psi_r = L_m i_s + L_r i_r \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2015-03-19;修回日期:2016-05-24

基金项目:国家电网公司科技项目(JB17201300189)

Project supported by the Science and Technology Program of SGCC(JB17201300189)

由式(1)可得:

$$\psi_r = \frac{L_m}{L_s} \psi_s + \frac{M}{L_s} i_r \quad (2)$$

$$i_r = \frac{\psi_s}{L_m} - \frac{L_s}{L_m} i_s \quad (3)$$

其中,  $u_s$ 、 $i_s$ 、 $\psi_s$  和  $u_r$ 、 $i_r$ 、 $\psi_r$  分别为定子侧和转子侧电压、电流、磁链的空间矢量;  $R_s$ 、 $R_r$  分别为定、转子侧绕组的电阻;  $L_s$ 、 $L_r$  和  $L_m$  分别为定、转子侧的自感和互感;  $M = L_s L_r - L_m^2$ ;  $\omega_1$  为同步旋转角速度;  $\omega_r$  为转子角速度;  $\omega_s$  为转差角速度;  $s$  为转差频率,  $s = (\omega_1 - \omega_r) / \omega_1$ ;  $d$  为微分算子。考虑到研究的暂态过程很短, 转子转速变化不会很大, 所以, 在短路期间可不考虑转子的运动方程, 将转子转速视作恒定。

## 2 DFIG 短路电流特性及 PI 控制参数的影响分析

### 2.1 故障后定子磁链解析

DFIG 结构及其转子侧撬棒保护电路见图 1。

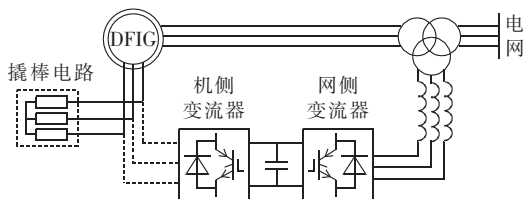


图 1 DFIG 及其转子侧撬棒保护电路

Fig.1 DFIG and circuits of its rotor-side Crowbar protection

假设  $t=0$  时刻, 电网发生三相短路, 在同步旋转坐标系下, 短路前后 DFIG 定子电压矢量为:

$$u_s = \begin{cases} u_s & t \leq 0 \\ ku_s & t > 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $u_s$  为故障前稳态电压;  $ku_s$  为电网发生短路后机端残压,  $k \in (0, 1)$ 。

$t=0$  时刻, 定子电流为:

$$i_{s0} = -[S_w / (3u_s)]^* \quad (5)$$

其中,  $i_{s0}$  为稳态运行时定子电流矢量;  $S_w$  为风电机组输出的复功率; “\*”表示共轭运算。

由于定子电阻较小, 分析时可忽略。根据式(1)中的定子电压方程, 故障前稳定状态下, 定子磁链为:

$$\psi_s = u_s / (j\omega_1) \quad (6)$$

根据磁链守恒定律, 机端发生电压跌落时, 定子磁链不能突变, 这会导致跌落电压在定子磁链中产生正比于跌落电压的暂态衰减分量, 暂态衰减分量以定子衰减时间常数  $\tau_s (\tau_s = M / (L_r R_s))$  衰减。同理, 根据式(1)的定子电压方程, 考虑定子衰减时间常数的影响, 利用式(3)定子磁链故障初始时刻表达式, 求解故障后定子磁链表达式为:

$$\psi_s = \frac{ku_s}{j\omega_1} + \frac{(1-k)u_s}{j\omega_1} e^{-j\omega_1 t} e^{-t/\tau_s} = \psi_{sn} + \Delta\psi_s \quad (7)$$

从式(7)可以看出, 电网故障后的定子磁链可以分为两部分: 第一部分是故障后定子磁链稳态分量  $\psi_{sn}$ , 第二部分为定子绕组中感应出的暂态衰减分量  $\Delta\psi_s$ 。定子磁链的暂态分量交链转子绕组导致其感应的转子电压瞬时突变升高, 由于变频器的容量有限(通常只有风机容量的 30%), 其向转子提供的电压不足以抵消此时的转子励磁电压, 导致转子回路产生很大的暂态冲击电流。为防止冲击电流对功率器件造成永久性损伤, 一般投入撬棒保护电路以抑制短路电流。

但是, 若电网电压跌落程度不大, 故障后的最大转子电压幅值仍在转子侧变频器可输出的最大励磁电压范围内, 则 DFIG 处于可控的运行状态, 此时不需要立即投入撬棒保护电路, 可充分发挥 DFIG 转子侧变频器的既定容量, 通过采取有效的控制策略实现 DFIG 的电网故障穿越。

### 2.2 DFIG 转子侧变频器控制原理

正常运行状态下, DFIG 的控制系统采用闭环控制<sup>[17]</sup>, 为了实现机组输出功率的解耦控制, 有功功率和无功功率分别由同步旋转坐标系内的转子电流  $q$  轴分量和  $d$  轴分量决定。根据定子磁链定向控制原理, 转子电流的参考值为:

$$\begin{cases} i_{rd,ref} = \frac{\psi_{sn}}{L_m} - \frac{2L_s Q_{s,ref}}{3L_m k u_s} \\ i_{rq,ref} = -\frac{2L_s P_{s,ref}}{3L_m k u_s} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $i_{rd,ref}$ 、 $i_{rq,ref}$  分别为转子  $d$ 、 $q$  轴电流分量的参考值;  $\psi_{sn}$  为定子磁链幅值;  $P_{s,ref}$ 、 $Q_{s,ref}$  分别为有功、无功功率的参考值;  $u_s$  为定子电压瞬时值。

DFIG 转子侧变频器控制框图如图 2 所示<sup>[12]</sup>。图 2 中, 转子电流参考值  $i_{rd,ref}$ 、 $i_{rq,ref}$  与转子电流反馈值  $i_{rd}$ 、 $i_{rq}$  比较后的差值送入 PI 控制器, 输出电压分量与电压补偿分量叠加, 就可以获得转子电压指令  $u_{rd}$ 、 $u_{rq}$ , 经过坐标变换后得到的转子电压进行脉宽调制后输出对转子侧变频器的驱动信号, 实现对 DFIG 的控制。

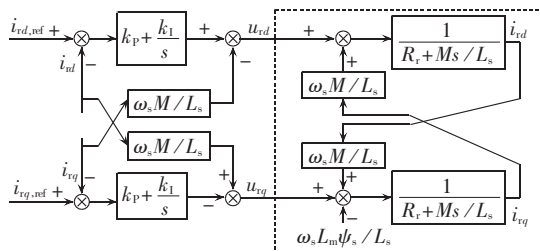


图 2 DFIG 转子侧变频器控制框图

Fig.2 Block diagram of rotor-side converter control for DFIG

图 2 中,  $u_{rd}$ 、 $u_{rq}$  分别为跟踪转子电流所需要的转子电压参考值。转子侧输出的转子电压方程为:

$$\mathbf{u}_r = k_p(\mathbf{i}_{r,\text{ref}} - \mathbf{i}_r) + k_i \int (\mathbf{i}_{r,\text{ref}} - \mathbf{i}_r) dt + j\omega_s \frac{M}{L_s} \mathbf{i}_r \quad (9)$$

其中,  $k_p, k_i$  分别为 PI 控制器的比例参数和积分参数;  $\mathbf{i}_{r,\text{ref}}$  为转子电流的参考值矢量。

考虑到 RSC 输出电流峰值受到功率器件电流最大通断能力的限制, 转子电流参考值为<sup>[18]</sup>:

$$\begin{cases} i_{rd,\text{ref}}^* = i_{rd,\text{ref}}, & i_{rq,\text{ref}}^* = i_{rq,\text{ref}} & G \leq I_{r,\text{max}} \\ i_{rd,\text{ref}}^* = \alpha i_{rd,\text{ref}}, & i_{rq,\text{ref}}^* = \alpha i_{rq,\text{ref}} & G > I_{r,\text{max}} \end{cases} \quad (10)$$

$$G = \sqrt{i_{rd,\text{ref}}^2 + i_{rq,\text{ref}}^2}, \quad \alpha = I_{r,\text{max}}/G$$

其中,  $i_{rd,\text{ref}}^*, i_{rq,\text{ref}}^*$  分别为考虑 RSC 容量限制下的转子  $d, q$  轴电流分量的参考值;  $I_{r,\text{max}}$  为 RSC 允许的最大交流侧电流峰值。

### 2.3 短路电流解析

假设  $t=0$  时刻, 电网发生三相短路, 若机端电压轻微跌落, 则此时转子侧过电流小于撬棒保护电流的动作阈值, 无法投入撬棒保护电流, 而转子侧仍连接有变频器。此时转子侧变频器的 PI 控制器可调节转子侧励磁电压, 从而影响故障过程中的定子电流。

将式(2)中的转子磁链代入式(1)中的转子电压表达式, 得到用  $\mathbf{i}_r$  和  $\boldsymbol{\psi}_s$  表示的转子电压方程为:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_r &= \frac{M}{L_s} \frac{d\mathbf{i}_r}{dt} + \left( R_r + j\omega_s \frac{M}{L_s} \right) \mathbf{i}_r + \mathbf{u}_{r0} \quad (11) \\ \mathbf{u}_{r0} &= \frac{L_m}{L_s} (d\boldsymbol{\psi}_s + j\omega_s \boldsymbol{\psi}_s) \end{aligned}$$

其中,  $\mathbf{u}_{r0}$  为空载电势, 其是由定子磁链交链感生的电动势。

图 3 为转子侧变频器不退出运行时的转子回路等效图。故障后转子电压近似等效为  $R_r \mathbf{i}_r + j\omega_s M/L_s \times \mathbf{i}_r + M/L_s d\mathbf{i}_r$  和  $\mathbf{u}_{r0}$  两部分, 同时可由转子侧变频器的控制系统中获取控制转子电流的转子电压。

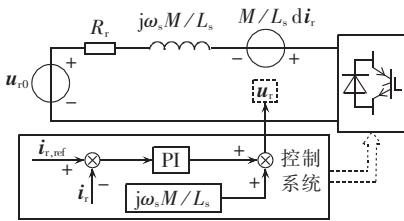


图 3 转子侧变频器不退出运行时的转子回路等效电路图

Fig.3 Equivalent rotor circuit diagram with operating rotor-side converter

因此, 联立式(9)和式(11), 并将式(3)中转子电流的表达式代入, 得到采用定子电流  $\mathbf{i}_s$  和定子磁链  $\boldsymbol{\psi}_s$  表示的数学表达式为:

$$\begin{aligned} \frac{M}{L_m} d^2 \mathbf{i}_s + \frac{L_s(R_r + k_p)}{L_m} d\mathbf{i}_s + \frac{L_s k_i}{L_m} \mathbf{i}_s &= \frac{L_r}{L_m} d^2 \boldsymbol{\psi}_s + \\ &\left( \frac{R_r + k_p}{L_m} + j\omega_s \frac{L_m}{L_s} \right) d\boldsymbol{\psi}_s + \frac{k_i}{L_m} \boldsymbol{\psi}_s - k_i \mathbf{i}_{r,\text{ref}} \quad (12) \end{aligned}$$

将式(7)故障后的定子磁链方程代入式(12), 可得到关于定子电流的二阶微分方程为:

$$\begin{aligned} d^2 \mathbf{i}_s + \frac{L_s(R_r + k_p)}{M} d\mathbf{i}_s + \frac{L_s k_i}{M} \mathbf{i}_s &= \\ \frac{1}{M} \left[ \frac{\omega_s \omega_1 L_m^2}{L_s} - \omega_1^2 L_r - j\omega_1 (R_r + k_p) + k_i \right] \Delta \boldsymbol{\psi}_s + \\ \frac{k_i}{M} \boldsymbol{\psi}_{s0} - \frac{k_i L_m}{M} \mathbf{i}_{r,\text{ref}} \quad (13) \end{aligned}$$

参考 PSCAD 中风机模型相关参数(见表 1), 对该二阶微分方程的特征方程的根进行判别, 可知其含有 2 个不相等的实根, 求解该微分方程, 可得到与之对应的通解和特解, 并将其由同步旋转坐标系转换到静止坐标系下, 可得故障后转子变频器不退出运行时定子电流表达式为:

$$\mathbf{i}_s = \mathbf{i}_{s,n} + \Delta \mathbf{i}_{s,\text{dc}} + \Delta \mathbf{i}_{s,\text{ac}} \quad (14)$$

$$\mathbf{i}_{s,n} = A e^{j\omega_1 t} = \left( \frac{k u_s}{j\omega_1 L_s} - \frac{L_m}{L_s} \mathbf{i}_{r,\text{ref}} \right) e^{j\omega_1 t}$$

$$\Delta \mathbf{i}_{s,\text{dc}} = B e^{-t/\tau_s} =$$

$$\frac{[k_1 - j\omega_1 (R_r + k_p) - \omega_1^2 L_r + \omega_1 \omega_s L_m^2 / L_s]}{-j\omega_1^3 M + \omega_1^2 L_s (R_r + k_p) + j\omega_1 L_s k_i} (1 - k) u_s e^{-t/\tau_s}$$

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{i}_{s,\text{ac}} &= \Delta \mathbf{i}_{s,\text{ac}1} + \Delta \mathbf{i}_{s,\text{ac}2} = C_1 e^{j\omega_1 t} e^{-t/\tau_{r1}} + C_2 e^{j\omega_1 t} e^{-t/\tau_{r2}} = \\ &= \frac{-\tau_{r1} \mathbf{i}_{s0} + \tau_{r1} A - [(j\omega_1 + 1/\tau_s) \tau_{r1} \tau_{r1} - \tau_{r1}] B}{\tau_{r1} - \tau_{r2}} e^{j\omega_1 t} e^{-t/\tau_{r1}} + \\ &= \frac{-\tau_{r2} \mathbf{i}_{s0} + \tau_{r2} A - [(j\omega_1 + 1/\tau_s) \tau_{r2} \tau_{r2} - \tau_{r2}] B}{\tau_{r1} - \tau_{r2}} e^{j\omega_1 t} e^{-t/\tau_{r2}} \end{aligned}$$

$$\tau_{r1} = 2M / \{ L_s [ (R_r + k_p) - \sqrt{(R_r + k_p)^2 - 4k_1 M / L_s} ] \}$$

$$\tau_{r2} = 2M / \{ L_s [ (R_r + k_p) + \sqrt{(R_r + k_p)^2 - 4k_1 M / L_s} ] \}$$

其中,  $\tau_{r1}, \tau_{r2}$  为衰减时间常数。

表 1 1.5 MW DFIC 参数

Table 1 Parameters of 1.5 MW DFIC

| 参数                    | 参数值        | 参数              | 参数值        |
|-----------------------|------------|-----------------|------------|
| 额定电压 $U_n$            | 690 V      | 定子自感 $L_s$      | 0.177 p.u. |
| 额定功率 $S_{\text{nom}}$ | 1.5 MW     | 转子自感 $L_r$      | 0.116 p.u. |
| 系统频率 $f$              | 50 Hz      | 转子转速 $\omega_r$ | 1.15 p.u.  |
| 定子侧电阻 $R_s$           | 0.022 p.u. | 比例系数 $k_p$      | 0.1        |
| 转子侧电阻 $R_r$           | 0.026 p.u. | 积分系数 $k_i$      | 1.667      |
| 定、转子互感 $L_m$          | 4.68 p.u.  |                 |            |

根据式(14)可知, 在三相静止坐标系中, 定子电流含有  $\mathbf{i}_{s,n}, \Delta \mathbf{i}_{s,\text{dc}}, \Delta \mathbf{i}_{s,\text{ac}}$  3 种成分。其中, 稳态基频分量  $\mathbf{i}_{s,n}$  的幅值与机端电压跌落程度及转子电流参考值有关。  $\Delta \mathbf{i}_{s,\text{dc}}$  为短路电流的直流分量, 其大小由机端电压跌落的幅值及转子侧变频器电流内环 PI 控制参数  $k_p, k_i$  决定, 并以定子回路衰减时间常数  $\tau_s$  呈指数衰减。  $\Delta \mathbf{i}_{s,\text{ac}}$  由  $\Delta \mathbf{i}_{s,\text{ac}1}$  和  $\Delta \mathbf{i}_{s,\text{ac}2}$  两部分组成, 若  $R_r + k_p \geq 2\sqrt{k_1 M / L_s}$ , 则  $\Delta \mathbf{i}_{s,\text{ac}1}$  和  $\Delta \mathbf{i}_{s,\text{ac}2}$  为暂态基频交流衰减分量, 其幅值均由定子电流初始值及 PI 参数共同决定, 并分别以衰减时间常数  $\tau_{r1}, \tau_{r2}$  衰减; 若  $R_r + k_p < 2\sqrt{k_1 M / L_s}$ , 则  $\Delta \mathbf{i}_{s,\text{ac}1}$  和  $\Delta \mathbf{i}_{s,\text{ac}2}$  中除了基频交流衰减分量外, 还有与 PI 参数有关的衰减频率分量。

## 2.4 PI 参数对短路电流特性的影响

电网发生故障时机端电压跌落导致磁链突变、转子回路产生过电流,这将会在 PI 控制器的输入端产生偏差,但是 PI 控制器可以依靠 PI 控制参数(比例参数  $k_p$ 、积分参数  $k_i$ )消除此偏差,促使风电系统在故障发生后达到较为稳定的状态。分析式(14)短路电流的成分可知,其中包含的直流分量的幅值、交流衰减分量的幅值以及衰减时间常数都与转子控制系统的 PI 控制参数有关,因此,通过调节 PI 参数可在一定程度上减小短路故障所导致的过电流,从而对故障引起的扰动实施有效的控制。在此调整过程中,要确保控制系统的稳定性,实现转子电流给定值的稳态跟踪。

转子侧变流器控制参数的设计,考虑电流内环反馈信号采样延时和变换器的延时,通过零极点对消,按照典型 I 型系统参数整定关系而得<sup>[19]</sup>。根据图 2 所示的 DFIG 转子侧变频器控制框图,实现解耦后,得到系统的开环波特图。

图 4 是保持积分参数  $k_i$  不变( $k_i=1.667$ ),改变比例参数  $k_p$  的情况下的系统开环波特图。当比例参数  $k_p$  分别取 0.1、0.3、0.5 时,相角裕度依次是  $67.5^\circ$ 、 $88.25^\circ$ 、 $88.95^\circ$ 。工程上通常要求系统相角裕度大于  $45^\circ$ <sup>[18]</sup>,所以系统在上述  $k_p$  的取值下具有较好的稳定性,可实现良好的稳定跟踪。在一定的比例参数调整范围内,比例参数越大,系统的稳定性越好。

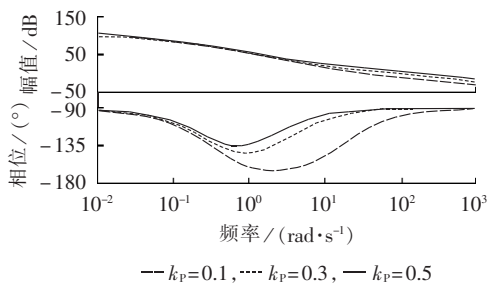


图 4  $k_i=1.667$  时,不同  $k_p$  下的开环波特图  
Fig.4 Open-loop Bode plot for different values of  $k_p$ , when  $k_i=1.667$

同理,可得到当比例参数保持不变,积分参数取不同值时的开环波特图,如图 5 所示。分析波特图可知,系统仍具有良好的控制性能,在一定的积分参数调整范围内,随着积分参数的减小,相角裕度越大,系统稳定性越好。

根据以上的解析计算过程编写 MATLAB 程序,模型参数如表 1 所示。为了更加直观地比较故障后短路电流的相对大小,以下波形均采用标么值。以三相对称故障为例,针对机端电压跌落至 50% 的情况,取 DFIG 定子 A 相电流  $i_A$ ,在保持积分参数  $k_i$  ( $k_i=1.667$ ) 不变、改变比例参数  $k_p$  的情况下得到了短路电流波形对比图,如图 6 所示(图中  $i_A$  为标么值,后

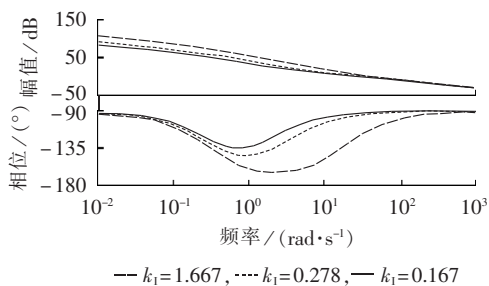
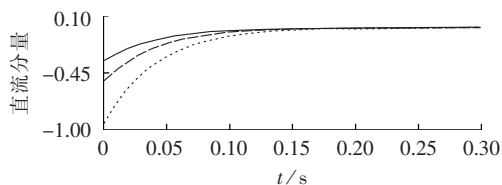
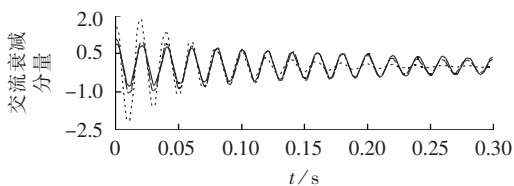


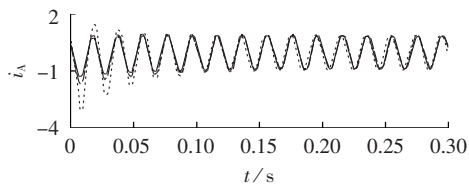
图 5  $k_p=0.1$  时,不同  $k_i$  的开环波特图  
Fig.5 Open-loop Bode plot for different values of  $k_i$ , when  $k_p=0.1$



(a) 短路电流的直流分量



(b) 短路电流的交流衰减分量



(c) 短路全电流波形

·····  $k_p=0.1$ , ---  $k_p=0.3$ , —  $k_p=0.5$

图 6  $k_i=1.667$  时,不同  $k_p$  下的短路电流波形对比图  
Fig.6 Comparison of short circuit current waveforms among different values of  $k_p$ , when  $k_i=1.667$

同);在保持比例参数  $k_p$  ( $k_p=0.1$ ) 不变、改变积分参数  $k_i$  的情况下得到了短路电流波形对比图,见图 7。

分析图 6 可知,随着比例参数  $k_p$  的减小,图 6(a) 中短路电流直流分量的幅值略有减小,而图 6(b) 中交流衰减分量的幅值却随之有明显的增大,且其衰减速度变快,导致交流衰减分量迅速衰减至零,快速过渡到稳定状态。但是由于短路电流中交流衰减分量所占比重大于直流分量,短路电流随比例参数  $k_p$  的减小有明显增大的趋势。综上可得,调节  $k_p$  对故障瞬间短路电流的幅值影响较大。

图 7 给出了调整积分参数  $k_i$  情况下的短路电流波形,图 7(a) 中短路电流直流分量的幅值并没有太大变化,图 7(b) 中交流衰减分量的幅值随着  $k_i$  的减小略有减小且其衰减时间常数随之减小。虽然短路电流中交流衰减分量所占比重远大于直流分量,但

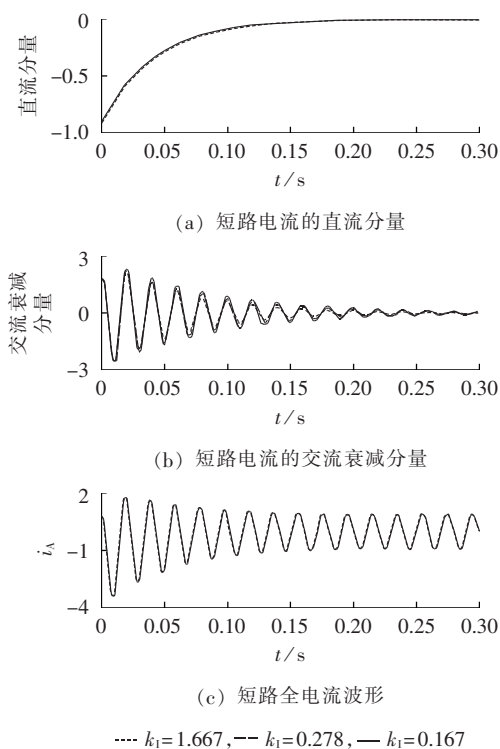


图 7  $k_p=0.1$  时,不同  $k_1$  下的短路电流波形对比图  
Fig.7 Comparison of short circuit current waveforms among different values of  $k_1$ ,when  $k_p=0.1$

由于积分参数  $k_1$  的变化给交流衰减分量带来的增幅并不明显,导致图 7(c)中,随着积分参数  $k_1$  的增大,短路电流并没有明显的变化。

根据以上分析,若故障期间变频器仍然接入转子侧回路,可依靠调控 PI 控制参数来调整转子励磁电压,从而影响定子电流中的直流分量和交流衰减分量,达到抑制短路电流的目的;相比于调节积分参数  $k_1$ ,调节比例参数  $k_p$  能达到更优的效果。需要注意的是,必须要在一个安全的调控范围内调整 PI 控制参数,以保证控制系统乃至整个风电系统的稳定运行,否则会导致风电系统发生振荡,严重时会导致风电机组。

### 3 仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 中搭建了 1.5 MW 的 DFIG 仿真模型,DFIG 基本参数如表 1 所示。通过仿真波形与解析计算波形对比,验证本文解析计算所得的定子短路电流计算表达式的有效性。

假设  $t=0$  s 时,DFIG 机端发生三相短路,机端残压为 0.7 p.u.,在考虑转子侧控制系统影响下定子 ABC 三相的短路电流解析计算波形与仿真波形对比图,如图 8 所示。由于电网短路持续时间较短,电网故障期间转速的变化忽略不计。

由图 8 的三相短路电流解析计算波形与仿真波形对比可以看出,定子电流变化趋势基本一致,电网

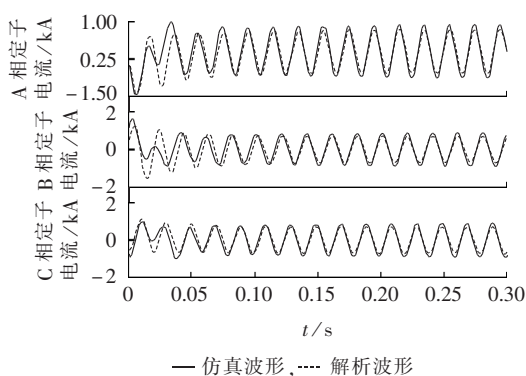


图 8 机端残压为 0.7 p.u. 时三相短路电流的仿真波形和解析计算波形对比图

Fig.8 Comparison of three-phase short circuit current between simulative and calculated waveforms,when residual voltage is 0.7 p.u.

短路瞬间,在定子磁链和转子电压的作用下,定子电流增大,并呈现衰减振荡。在故障电流的起始阶段,二者幅值有一定差异,分析可知这是由本文主要计及变频器电流内环控制,而忽略了功率外环控制导致的结果。随着直流分量和交流衰减分量衰减为零,故障后定子电流达到稳态。图 9 给出了机端残压为 0.7 p.u. 时,A 相短路电流基波分量的计算波形与仿真波形对比图,通过分析对比可知,短路电流的基波分量基本吻合,进一步验证了解析表达式的有效性。

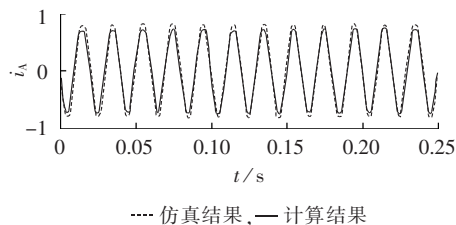


图 9 机端残压为 0.7 p.u. 时 A 相短路电流基波分量的仿真波形和解析计算波形对比图

Fig.9 Comparison of fundamental component of phase-A short circuit current between simulative and calculated waveforms,when residual voltage is 0.7 p.u.

以 DFIG 机端发生三相短路,机端残压为 0.5 p.u. 的情况为例,利用搭建的 PSCAD 仿真模型,在保持积分参数  $k_1$  不变、调整比例参数  $k_p$  的情况下得到了 DFIG 定子 A 相短路电流波形,如图 10 所示;与之相类似,在保持  $k_p$  不变、调整  $k_1$  的情况下得到了 DFIG 定子 A 相短路电流波形,如图 11 所示。

由以上的仿真波形对比图可以看出,在  $k_1$  固定、调整比例参数  $k_p$  的情况下,短路电流变化较为明显;而固定  $k_p$ 、调整积分参数  $k_1$  的情况下,短路电流变化较小,这与图 6 和图 7 分析 PI 控制参数对短路电流的影响时得到的研究结果基本一致。

实际上,根据控制系统的要求,转子侧的 PI 参数可在一定范围内选择,而在此范围内通过调节 PI

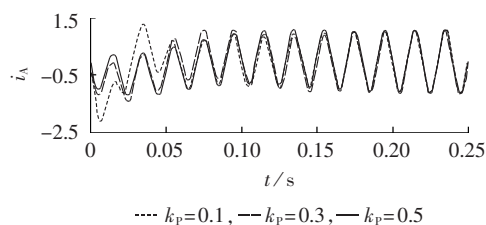


图 10  $k_i=1.667$  时,不同  $k_p$  下的短路电流波形对比图

Fig.10 Comparison of short circuit current waveforms among different values of  $k_p$ , when  $k_i=1.667$

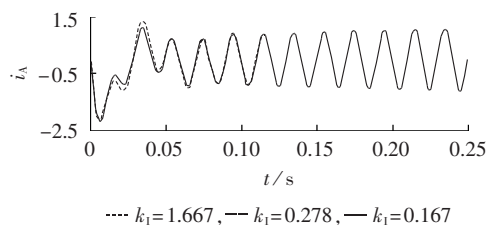


图 11  $k_p=0.1$  时,不同  $k_i$  下的短路电流波形对比图

Fig.11 Comparison of short circuit current waveforms among different values of  $k_i$ , when  $k_p=0.1$

参数可在一定程度上起到抑制定子短路电流的作用。但需要指出的是,由于转子侧的 PI 参数在控制系统要求下的选择范围较小,因此 PI 参数对短路电流的抑制作用有限。针对 DFIG 的机端电压跌落故障,不能只依靠 PI 参数来抑制短路电流,还是要通过控制策略切换和撬棒保护等措施来实现 DFIG 的低电压穿越。

## 4 结语

本文以对称故障为例,通过 DFIG 矢量模型中的电压、磁链方程,联立转子侧变频器电压控制方程,采用数学解析的方法推导了故障发生后转子侧变频器不闭锁的情况下定子电流的解析表达式,并得出以下结论:在三相静止坐标系下,定子电流中含有稳态基频分量、直流分量以及交流衰减分量,机端电压跌落程度以及 PI 控制参数是影响各分量幅值及衰减时间常数的重要因素;在保证风电系统安全稳定运行的前提下,通过调控 PI 参数,可消除由于故障时转子侧过电流造成的 PI 控制器输入端的偏差,达到抑制短路电流的目的。最后,通过在 PSCAD/EMTDC 中搭建的 DFIG 模型进行仿真测试,验证了短路电流表达式的有效性。另外,在研究考虑双环控制系统的情况下 DFIG 短路电流特性时,可延续本文中采用的数学解析法进行分析,具体分析有待进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 焦在强. 大规模风电接入的继电保护问题综述[J]. 电网技术, 2012, 36(7):195-201.  
JIAO Zaiqiang. A survey on relay protection for grid-connection of large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2012, 36(7):195-201.
- [2] 郑重,杨耕,耿华. 电网故障下基于撬棒保护的双馈风电机组短路电流分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11):7-14.  
ZHENG Zhong, YANG Geng, GENG Hua. Short-circuit current analysis for DFIG-based wind generation system with Crowbar protection under grid faults[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11):7-14.
- [3] 孔祥平,张哲,尹向根. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34):65-74.  
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34):65-74.
- [4] SULLA F, SVENSSON J, SAMUELSSON O. Symmetrical and unsymmetrical short-circuit current of squirrel-cage and doubly-fed induction generators[J]. Electric Power Systems Research, 2011(81):1610-1618.
- [5] 马文龙. Crowbar 保护在双馈异步风力发电系统电网故障穿越中的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7):127-130.  
MA Wenlong. Application of Crowbar circuit in grid fault riding through for doubly-fed induction wind power generation system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7):127-130.
- [6] 徐殿国,王伟,陈宁. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22):29-36.  
XU Dianguo, WANG Wei, CHEN Ning. Dynamic characteristic analysis of doubly-fed induction generator low voltage ride-through based on Crowbar protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22):29-36.
- [7] 李辉,付博,杨超. 双馈风电机组低电压穿越的无功电流分配及控制策略改进[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(22):24-31.  
LI Hui, FU Bo, YANG Chao. Reactive current allocation and control strategies improvement of low voltage ride through for doubly fed induction wind turbine generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(22):24-31.
- [8] HU Jiabing, HE Yikang, XU Lie. Improved control of DFIG systems during network unbalance using PI-R current regulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(2):439-451.
- [9] 姚骏,廖勇,李辉. 电网电压不平衡下采用串联网侧变换器的双馈感应风电系统改进控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6):121-130.  
YAO Jun, LIAO Yong, LI Hui. Improved control of a doubly fed induction generator wind turbines with a series grid-side converter under unbalanced grid voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(6):121-130.
- [10] 年珩,程鹏,诸自强. 电网电压对称故障时 DFIG 转子电流的优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7):200-208.  
NIAN Heng, CHENG Peng, ZHU Ziqiang. Optimized control strategy of rotor current for doubly fed induction generators during symmetrical voltage fault[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7):200-208.
- [11] RAHIMI M, PARNIANI M. Grid-fault ride-through analysis and control of wind turbines with doubly fed induction generators [J]. Electric Power Systems Research, 2010(8):184-195.
- [12] 张建华,陈星莺,刘皓明,等. 双馈风力发电机三相短路分析短路

- 器最大电阻整定[J]. 电力自动化设备,2009,29(4):6-10.
- ZHANG Jianhua,CHEN Xingying,LIU Haoming,et al. Three-phase short-circuit analysis for doubly fed wind-driven generator and short-circuititer maximal resistance calculation[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(4):6-10.
- [13] 撒奥洋,张哲,尹项根,等. 双馈风力发电系统故障特性及保护方案构建[J]. 电工技术学报,2012,27(4):233-239.
- HAN Aoyang,ZHANG Zhe,YIN Xianggen,et al. Research on fault characteristic and grid connecting-point protection scheme for wind power generation with doubly-fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(4):233-239.
- [14] 熊小伏,欧阳金鑫. 电网短路时双馈感应发电机转子电流的分析与计算[J]. 中国电机工程学报,2012,32(28):114-121.
- XIONG Xiaofu,OUYANG Jinxin. Analysis and calculation of rotor currents for doubly-fed induction generators under short circuits in power grids[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(28):114-121.
- [15] 孔祥平,张哲,尹项根,等. 计及励磁调节特性影响的双馈风力发电机组故障电流特性[J]. 电工技术学报,2014,29(4):256-265.
- KONG Xiangping,ZHANG Zhe,YIN Xianggen,et al. Fault current characteristics of DFIG considering excitation and regulation characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(4):256-265.
- [16] 周宏林,杨耕. 不同电压跌落深度下基于撬棒保护的双馈式风机短路电流特性分析[J]. 中国电机工程学报,2009,29(增刊1):184-191.
- ZHOU Honglin,YANG Geng. Short circuit current characteristics of doubly fed induction generator with Crowbar protection under different voltage dips[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(Supplement 1):184-191.
- [17] 王勇,张纯江,柴秀慧,等. 电网电压跌落情况下双馈风力发电机电磁过渡过程及控制策略[J]. 电工技术学报,2011,26(12):14-19.
- WANG Yong,ZHANG Chunjiang,CHAI Xiuhui,et al. Electromagnetic transient process and control strategy for doubly-fed wind power generator under grid voltage dip[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(12):14-19.
- [18] 张禄,金新民,唐芬,等. 电网电压对称跌落下的双馈感应发电机PI-R控制及改进[J]. 中国电机工程学报,2013,33(3):106-116.
- ZHANG Lu,JIN Xinmin,TANG Fen,et al. Improved PI-R control for doubly fed induction generators under grid voltage symmetrical dip[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(3):106-116.
- [19] 张崇巍,张兴. PWM整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2003:88-92.

#### 作者简介:



郑涛

郑涛(1975—),男,山东济南人,副教授,博士,从事新能源电力系统保护与控制方面的研究(E-mail: zhengtao\_sf@126.com);

魏旭辉(1990—),男,甘肃平凉人,硕士研究生,从事新能源电力系统保护与控制方面的研究(E-mail: hdweixuhui@163.com);

李娟(1990—),女,山东济宁人,硕士研究生,从事新能源电力系统保护与控制方面的研究(E-mail: j\_er2012@126.com);

李菁(1989—),女,山东菏泽人,博士研究生,主要从事风力发电及其对继电保护影响方面的研究(E-mail: lijing\_ncepu@163.com);

王燕萍(1991—),女,浙江杭州人,硕士研究生,主要从事新能源保护与控制方面的研究(E-mail: WangYanping\_zhao@163.com);

杨国生(1977—),男,甘肃武威人,硕士,从事电力系统继电保护方面的研究(E-mail: yangguosheng@epri.ac.cn);

王增平(1964—),男,河北辛集人,教授,博士研究生导师,博士,从事电力系统保护与控制方面的研究(E-mail: wangzp1103@sina.com);

李霞(1964—),女,河北承德人,高级工程师,从事发电厂及电力系统保护方面的研究(E-mail: Lx3320@sohu.com)。

## Influence of PI control parameters on short circuit current characteristics of DFIG

ZHENG Tao<sup>1</sup>,WEI Xuhui<sup>1</sup>,LI Juan<sup>1</sup>,LI Jing<sup>1</sup>,WANG Yanping<sup>1</sup>,YANG Guosheng<sup>2</sup>,

WANG Zengping<sup>1</sup>,LI Xia<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. Chengde Power and Economic Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Chengde 067000, China)

**Abstract:** During a mild terminal voltage dip, DFIG (Doubly Fed Induction Generator) may not put the Crowbar protection into operation but change its rotor-side control strategy to suppress the rotor-side overcurrent, which may induce decaying transient components in the short circuit current of stator. The PI parameters of DFIG control system are the main influencing factors of the induced transient components. A symmetrical fault of stator terminal, when the Crowbar protection is not put into operation during the mild terminal voltage dip, is taken as an example to deduce the DFIG short circuit current expression for theoretically analyzing the influence of PI parameters of rotor-side converter control system on the characteristics of DFIG short circuit current, which are further verified by the PSCAD simulation.

**Key words:** doubly fed induction generators; wind power; symmetrical fault; rotor-side converter; stator current; short circuit currents; PI parameters; computer simulation