

计及RSC控制的DFIG短路电流直流分量解析表达

李生虎¹, 王鹏飞¹, 孙 琪¹, 吴 东², 黄杰杰¹

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009; 2. 天津电力公司检修公司, 天津 300232)

摘 要: 现有文献针对计及转子变流器(RSC)控制的双馈感应风电机组(DFIG)定子短路电流解析表达,将定子磁链当作一阶直流衰减分量或忽略功率外环控制。基于DFIG电压、磁链和RSC控制方程,得到定子电流关于定子电压和定子功率的传递函数,提出定子电流的精确解析表达式。基于RSC内、外环PI参数关系,推导直流分量衰减时间常数和角频率关于PI参数的表达式。分析了RSC内外环PI参数对定子电流直流衰减分量的影响。仿真结果验证了解析表达式的准确性,为PI参数选取和保护装置测量、整定提供依据。

关键词: 风电; 短路电流; 传递函数; 直流衰减分量; 转子变流器; PI参数; 解析表达

中图分类号: TM614; TM713 **文献标志码:** A

0 引 言

双馈感应风电机组(doubly-fed induction generator, DFIG)的转子侧变流器(rotor side converter, RSC)容量有限^[1]。当外网故障引起电压跌落时,在转子回路产生过电流或过电压,威胁DFIG安全。当电压非深度跌落,撬棒不动作,励磁电流仍由RSC控制,DFIG电磁暂态与变流器控制耦合,使得定、转子电流暂态较为复杂^[2-3]。

RSC采用双PI控制,外环产生转子电流参考值,内环通过调整转子电压跟踪转子电流参考值。PI参数影响RSC输出电压,因此有必要推导定子电流精确解析表达式,为选取PI参数、改进控制策略提供依据。目前计及RSC控制的定子电流解析表达,存在以下问题:

1)忽略定子电阻,将故障后定子磁链当作一阶衰减直流分量和稳态分量,直流衰减分量的衰减时间常数取值较为近似。

2)忽略转子变流器功率外环,在故障期间保持转子电流参考值恒定,影响计算精度。

定子电流直流分量衰减特性影响量测监控和保护^[4]。文献[5]分析了电流内环PI参数对定子电流暂态分量的影响,但将直流分量衰减时间常数当作定值。文献[6-7]利用叠加定理和微分方程求解,计算出定子电流解析表达式,发现直流衰减分量是一个频

率较低的衰减分量,时间常数和频率与内环PI参数有关,但忽略功率外环控制。计及功率外环的定子电流解析表达及PI参数对直流衰减分量的影响,尚未见到有文献提及。

本文根据DFIG定、转子电压、磁链和RSC控制方程,得到定子电流关于定子电压和功率的传递函数,分析故障后定子功率变化,推导出定子电流精确解析表达。基于定子功率简化传递函数,得到RSC外环PI参数关系,建立定子电流直流分量衰减时间常数和角频率与PI参数的关系,分析PI参数对直流衰减分量的影响。

1 定子电流精确解析表达式

按电动机惯例,在dq旋转坐标系下,DFIG定、转子电压和磁链方程为:

$$\begin{cases} V_s = R_s I_s + j\omega_s \psi_s + \frac{1}{\omega_B} \frac{d\psi_s}{dt} \\ V_r = R_r I_r + j(\omega_s - \omega_r) \psi_r + \frac{1}{\omega_B} \frac{d\psi_r}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \psi_r = L_r I_r + L_m I_s \end{cases} \quad (2)$$

式中, V_s 、 V_r 、 I_s 、 I_r 、 ψ_s 、 ψ_r ——定、转子电压、电流、磁链, pu; R_s 、 R_r ——定、转子电阻, pu; L_s 、 L_r 、 L_m ——定、转子侧自感和励磁电感, pu; ω_s 、 ω_r ——定、转子角速度, pu; t ——时间, s; ω_B ——同步旋转角速

收稿日期: 2017-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(51277049; 51637004)

通信作者: 李生虎(1974—), 男, 博士、教授, 主要从事电力系统规划与可靠性、风电系统 分析与控制、柔性输电方面的研究。
shenghuli@hfut.edu.cn

度, rad/s。

RSC 电流内环控制速度很快, 可认为变流器转子侧电压能够跟踪其参考值。采用定子电压定向 d 轴, 通过功率外环 PI 控制产生转子 d、q 轴电流参考值, 实现定子有功、无功解耦控制, 则 RSC 内环和外环控制方程为:

$$V_r = j(\omega_s - \omega_r)\psi_r + \left(k_{pl} + \frac{\omega_b k_{il}}{s}\right)(I_{ref} - I_r) \quad (3)$$

$$I_{ref} = \left(k_{pll} + \frac{\omega_b k_{il}}{s}\right)(\tilde{S}_s^* - \tilde{S}_{sref}^*) \quad (4)$$

式中, k_{pl} 、 k_{pll} 、 k_{il} 、 k_{iil} ——转子电流内环、功率外环的比例系数和积分系数, 其中 k_{il} 、 k_{iil} 为标么值; I_{ref} ——转子电流参考值, pu; \tilde{S}_s^* 、 \tilde{S}_{sref}^* ——定子复功率及其参考值共轭, pu; s ——拉氏算子。

设 ω_s 不变, 联立式(1)~式(4), 消去转子电压和转子转速项, 写成增量形式, 然后进行拉式变换, 得到定子电流增量与定子复功率共轭增量和定子电压增量的传递函数形式:

$$\Delta I_s(s) = \frac{M}{G} \Delta V_s(s) - \frac{N}{sG} (\Delta \tilde{S}_s^*(s) - \Delta \tilde{S}_{sref}^*(s)) \quad (5)$$

$$G = G_d + jG_q$$

$$G_d = s^3 + s^2 \omega_b L' [R_s L_r + L_s (k_{pl} + R_r)] + s \omega_b^2 L' (R_s k_{pl} + R_r R_s + L_s k_{il}) + \omega_b^3 R_s k_{il} L' \quad (6)$$

$$G_q = \omega_s \omega_b [s^2 + s \omega_b L' (k_{pl} + R_r) + \omega_b^2 k_{il} L_s L']$$

式中, $L' = 1/(L_r L_s - L_m^2)$; G ——传递函数分母多项式;

$$M = \omega_b L' (s^2 L_r + s \omega_b (k_{pl} + R_r) + \omega_b^2 k_{il}) ;$$

$$N = \omega_b L_m L' (s + j\omega_s \omega_b) (s k_{pl} + \omega_b k_{il}) (s k_{pll} + \omega_b k_{iil}) 。$$

当外部电网发生对称故障, 忽略定子电压波动, 假定其阶跃变化, 由 V_{sd0} 变为 pV_{sd0} , p 为电压跌落系数。则电压增量拉式变换为:

$$\Delta V_s(s) = -\frac{(1-p)V_{sd0}}{s} \quad (7)$$

故障期间, 假定定子功率参考值不变, 或根据控制策略需求, 参考值阶跃变化 $\Delta \tilde{S}_{sref}^*$, 则定子功率参考值共轭增量的拉式变换为:

$$\Delta \tilde{S}_{sref}^*(s) = \frac{\Delta \tilde{S}_{sref}^*}{s} \quad (8)$$

故障时, 定子电流不突变。若故障后定子电压不变, 定子复功率共轭见式(9), 其增量拉式变换见式(10), 式中 I_{s0} 为故障前定子电流。

$$\tilde{S}_s^*(t) = \begin{cases} V_{sd0} I_{s0}, & \text{故障前} \\ pV_{sd0} I_s(t), & \text{故障后} \end{cases} \quad (9)$$

$$\Delta \tilde{S}_s^*(s) = pV_{sd0} \Delta I_s(s) - \frac{(1-p)V_{sd0} I_{s0}}{s} \quad (10)$$

将式(7)、式(8)、式(10)代入式(5)中, 得到定子电流增量的拉式形式:

$$\Delta I_s(s) = \frac{V_{sd0}(p-1)M}{G_s} + \frac{N((1-p)V_{sd0} I_{s0} + \Delta \tilde{S}_{sref}^*)}{sG_s} \quad (11)$$

$$G_s = sG + pV_{sd0} N \quad (12)$$

对式(11)进行拉式反变换, 得到故障后定子电流增量解析表达:

$$\Delta I_s(t) = \omega_b L' L_r (p-1) V_{sd0} \sum_{i=1}^4 B_i e^{s_i t} + \Delta I_{s\infty} + \omega_b L' L_m k_{pl} k_{pll} ((1-p)V_{sd0} I_{s0} + \Delta \tilde{S}_{sref}^*) \sum_{i=1}^4 A_i e^{s_i t} \quad (13)$$

$$A_i = \frac{(s_i - z_1)(s_i - z_2)(s_i - z_3)}{s_i \prod_{j=1, j \neq i}^4 (s_i - s_j)}, \quad B_i = \frac{(s_i - p_1)(s_i - p_2)}{\prod_{j=1, j \neq i}^4 (s_i - s_j)} \quad (14)$$

$$\Delta I_{s\infty} = \frac{(1-p)V_{sd0} I_{s0} + \Delta \tilde{S}_{sref}^*}{pV_{sd0}} \quad (15)$$

式中, s_i ——多项式 G_s 的 4 个解, $s_i = -\tau_i^{-1} + j\omega_i$, $i=1, 2, 3, 4$; τ_i 、 ω_i ——暂态分量衰减时间常数和角频率; z_1 、 z_2 、 z_3 —— N 的 3 个解; p_1 、 p_2 —— M 的 2 个解; A_i 、 B_i ——定子电流第 i 个暂态分量功率参考值增量项和定子电压增量项系数; $\Delta I_{s\infty}$ ——定子电压变化和功率参考值变化引起的定子电流稳态变化量, pu。

由式(13)~式(15)可知, 定子电压、定子功率阶跃变化时, 定子电流将产生 4 个暂态分量, 它们的幅值、角频率、衰减时间常数均与 RSC 内环、外环 PI 参数有关。需要指出, 定子电流表达式不含转子角速度项, DFIG 转速变化对定子电流无影响。注意 G_s 中含有故障后定子电压项 pV_{sd0} , 即定子电流暂态分量还与故障后电压有关。

以上推导过程假设条件仅为定子电压和定子功率参考值阶跃变化。与现有文献相比, 定子电流解析表达式具有较高精度, 有助于分析 RSC 的 PI 参数对定子电流直流衰减分量的影响。

2 定子电流直流衰减分量特性分析

定子电流解析表达式(13)是一元四次方程, 系数含有虚数, 直接求解较为复杂, 可根据控制内外环 PI 参数间关系, 确定定子电流暂态分量角频率、衰减时间常数与 PI 参数关系的简化表达。

2.1 功率外环比例与积分系数的关系

现有文献对电流内环 PI 参数设计较多, 一般是利

用转子电流关于其参考值的开环传递函数,得到 PI 参数间关系。文献[8-9]中基于简化开环传递函数,得到内环 PI 参数之间的关系为:

$$k_{il} = R_r L_s L' k_{pl} \quad (16)$$

对于外环 PI 参数间关系,现有文献较少提及。由式(5)可知,由于 $\Delta I_s(s)$ 、 $\Delta V_s(s)$ 均与 $\Delta \tilde{S}_s^*$ 有关,定子复功率共轭并不能写成关于其参考值和扰动量的传递函数,不能类似内环方法求解外环 PI 参数的关系。考虑到外环作用是追踪定子功率,当定子功率参考值变化,定子电压不变,且 V_{sd0} 近似为 1 时,式(5)可改写为:

$$\Delta \tilde{S}_s^*(s) = \frac{N}{sG} (\Delta \tilde{S}_{sref}^*(s) - \Delta \tilde{S}_s^*(s)) \quad (17)$$

则功率外环近似开环传递函数可表示为:

$$\varphi(s) = \frac{N}{sG} \quad (18)$$

将式(16)代入式(18),简化后进行因式分解:

$$\varphi(s) \approx \frac{\omega_B L_m L' k_{pl} (s + j\omega_B \omega_B) (s k_{pll} + \omega_B k_{iil})}{s(s + \omega_B L' L_s k_{pl}) [s + \omega_B (L' L_r R_s + j\omega_B)]} \quad (19)$$

同样利用零极点对消,可得到功率外环 PI 参数之间的关系:

$$k_{iil} = k_{pl} L_s L' k_{pll} \quad (20)$$

当定子电压不变,定子功率共轭与其参考值共轭的传递函数近似为式(21),其中 T_p 为定子功率惯性时间常数(s), $1/T_p = \omega_B L' L_m k_{pl} k_{pll}$ 。

$$\Delta \tilde{S}_s^*(s) = \frac{1}{T_p s + 1} \Delta \tilde{S}_{sref}^*(s) \quad (21)$$

2.2 衰减时间常数和角频率的计算

尽管 RSC 控制会影响直流分量的衰减时间常数和角频率,但在正常 PI 参数范围内,其频率偏移并不远,因此可写成直流分量加偏移量形式。将式(16)、式(20)代入(12),对其分解:

$$G_s = (s + \underbrace{\omega_B (R_s L_r L' + j\omega_B)}_{\text{直流分量}} - \underbrace{(\delta + j\xi)}_{\text{偏移量}}) (s + \omega_B R_r L_s L') \quad (22)$$

$$\left\{ s^2 + s \left[\omega_B L' k_{pl} (L_s + m k_{pll}) + (\delta + j\xi) \right] + \omega_B^2 m L' k_{pl} k_{iil} \right\}$$

式中, $m = p V_{sd0} L_m$ 。求解上述方程,得 4 个解:

$$\begin{cases} s_1 = -(1/T_s - \delta) - j(\omega_B - \xi) \\ s_2 = -1/T_r \\ s_3 \approx -(1/T_c + \delta) - j\xi \\ s_4 \approx -p V_{sd0} / T_p \end{cases} \quad (23)$$

式中, T_s 、 T_r ——定、转子暂态时间常数, s, $1/T_s = \omega_B L' L_r R_s$, $1/T_r = \omega_B L' L_s R_r$; T_c ——内环 PI 参数控制时

间常数, s, $1/T_c = \omega_B L' L_s k_{pl}$; δ 、 ξ ——直流分量衰减时间常数的倒数和角频率偏移量,其具体表达见附录。在正常 PI 参数范围内, $\delta < 1/T_s \ll 1/T_r$, $\xi \ll \omega_B$; 因此, $s_1 \approx (1/T_s \delta) j\omega_B$, $s_3 \approx 1/T_c$ 。

综上所述,定子电流将会产生 3 个工频衰减分量和一个直流衰减分量,前者常数分别为: T_s 、 T_c 和 $T_p/p V_{sd0}$ 。直流分量衰减时间常数偏离定子暂态时间常数,其偏移量与 PI 控制参数和跌落后的电压值有关,不能认为是定值。

3 算例分析

编写仿真程序,验证本文推导定子电流解析表达式正确性。DFIG 参数见文献[10]。

3.1 解析表达式的验证

设在 $t = 0.1$ s 时,外网故障导致定子电压跌落,跌落系数 $p = 0.7$,持续时间 0.6 s;故障前风电机组有功出力为 1,无功出力为 0;故障后定子功率参考值不变;PI 参数: $k_{pl} = 0.1$, $k_{pll} = 0.1$, k_{il} 、 k_{iil} 由式(16)、式(20)确定。定子电流解析表达和动态仿真结果的对比见图 1,两者基本重合,验证了所提定子电流解析表达式的正确性。

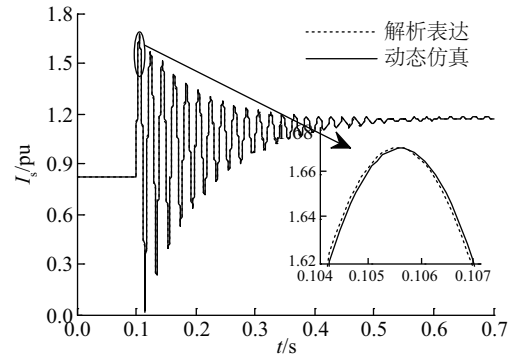


图 1 定子电流的解析表达与仿真结果对比

Fig. 1 Comparison of stator currents between analytical expressions and simulation results

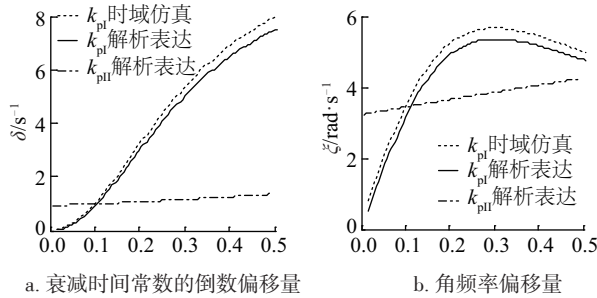
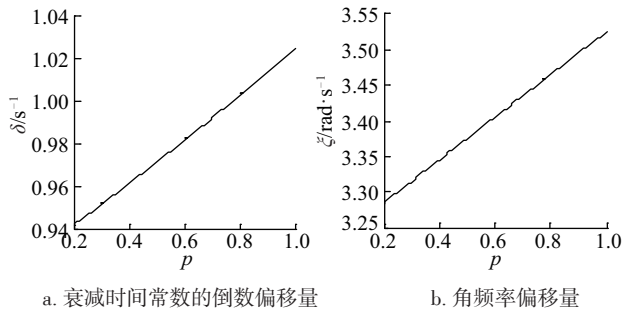
为验证所推导各暂态分量正确性,将动态仿真得到的故障后定子电流 dq 轴暂态分量进行 Prony 分解^[11],提取各个分量幅值、衰减因子(衰减时间常数的倒数)、频率。表 1 给出了根据 Prony 分解和式(23)计算得到的 4 个分量。两者基本相同,验证了所提公式的正确性。

表1 定子电流暂态分量衰减因子和频率

Table 1 Decaying factor and frequency of stator currents transient components				
定子电流暂态分量	1	2	3	4
衰减因子/s ⁻¹	9.72	8.56	98.99	6.98
Prony 频率/Hz	49.45	0.00	0.55	0.00
分解 d 轴幅值/pu	-0.28	0.01	0.29	0.34
q 轴幅值/pu	-0.87	-0.36	0.98	0.25
衰减因子/s ⁻¹	9.72	8.82	99.00	6.65
公式 频率/Hz	49.50	0	0.50	0
计算 d 轴幅值/pu	-0.28	-0.01	0.28	0.36
q 轴幅值/pu	-0.87	-0.35	0.98	0.25

3.2 PI参数对直流衰减分量的影响

继电保护装置的测量通常需要结合全波傅氏算法滤除直流分量^[7],准确计算衰减时间常数,有利于测量精度的提高。由附录中偏移量解析表达可知, δ 、 ξ 与RSC内、外环PI参数和跌落后定子电压有关。为了进一步分析参数 k_{pi} 、 k_{piI} 、 p 对直流分量偏移量影响,图2、图3给出了解析表达和时域仿真得到的偏移量,两者误差很小。取 $k_{piI}=0.1$, $p=0.7$,由图2可知,随着 k_{pi}

图2 k_{pi} 、 k_{piI} 对直流衰减分量偏移量的影响Fig. 2 Effects of k_{pi} and k_{piI} on decaying DC component图3 电压跌落系数 p 对直流衰减分量偏移量的影响Fig. 3 Effects of coefficient of voltage dips p on decaying DC component

在0~0.5内增大, δ 增大, ξ 先增大后减小,角频率偏移量最大值不超过6 rad/s,相对于同步旋转角频率314 rad/s,可以忽略,这验证了将其当作直流分量加偏移量的合理性; δ 变化范围为0~7.2,相对于 $1/T_s=10.71$,其变化范围较大,因而并不能简单将直流分量衰减系数看作定值。由式(A2)可见,当 k_{pi} 取极小值0, $\delta \approx 0$, $\xi \approx 0$,即 $\tau_1 = T_s$,直流分量以定子暂态时间常数衰减。当 k_{pi} 取极大值4时, $\delta \approx \omega_B R_s (L_r L' - 1/L_s)$, $\xi \approx 0$,即 $\tau_1 \approx L_s / (R_s \omega_B)$,直流分量以定子回路固有时间常数衰减。

由式(2)可知,定、转子电流、磁链具有相同分量和衰减特性,若将定子磁链当作一阶衰减直流分量,根据现有文献常见的两种衰减时间常数取法,定子磁链方程可以写成:

$$V_s + \frac{R_s L_m}{L_s} I_r = \left(\frac{R_s}{L_s} + j\omega_s \right) \psi_s + \frac{1}{\omega_B} \frac{d\psi_s}{dt} \quad (24)$$

$$V_s + R_s L_m L' \psi_r = (R_s L_r L' + j\omega_s) \psi_s + \frac{1}{\omega_B} \frac{d\psi_s}{dt}$$

而转子变流器PI控制中,比例系数大小决定控制快慢。由式(3)可知,当 k_{pi} 取极大值时,可认为转子电流能够追踪参考值, k_{piI} 较小时,则转子电流近似不变;当 k_{pi} 取极小值时,转子电压和转子磁链近似不变。现有文献衰减时间常数分别对应着转子电流、磁链不变时的取值,是两个极值时的特例,这也验证了本文所提算法的精确性。同时由式(23)可知,分量1、3、4时间常数均含有 k_{pi} ,结合表1数据,分量3衰减最快,而增大 k_{pi} ,将会延长分量1衰减时间,减小分量4衰减时间。当 $k_{pi} > 0.15$ 时,直流分量衰减最慢,定子电流和电磁转矩振荡时间延长,将会加剧机械磨损,且不利于控制系统稳定。而当 k_{piI} 在0~0.5范围内增大时, δ 、 ξ 最大分别增加0.4和1,相对于 k_{pi} 引起的偏移量变化偏小,即内环PI参数对直流分量衰减时间常数影响比外环大。由图3可见,电压跌落程度引起的偏移量变化近似不变,即可认为 p 对直流分量衰减时间常数无影响,但其对分量4影响较大,电压跌落程度越深,分量4衰减越慢,整个短路电流暂态过程时间将延长。

4 结 论

本文推导计及RSC双PI环控制的定子短路电流精确解析表达式;基于内外环PI参数关系,分析直流衰减分量暂态特性与PI参数关系。

1)定子电压对称跌落时,定子电流产生4个暂态分量,其中直流分量衰减时间常数不能认为是定值,增大

内、外环比例系数,衰减时间将会延长,但主要受内环比例参数影响。

2) 基于RSC内、外环PI参数关系下,除直流分量外的3个暂态分量可近似为工频分量,分别以转子暂态时间常数、内环PI控制时间常数和 $1/pV_{sd0}$ 倍的定子功率惯性时间常数衰减。

3) 直流分量衰减时间常数的准确计算有利于提高测量装置的精度。各分量衰减时间常数与PI参数的关系,可为PI参数选取提供参考,为DFIG故障分析和保护整定计算提供理论依据。

附录

直流分量的偏差量 δ 、 ξ 的计算公式:

$$\begin{cases} a = R_s k_{pl} L'^2 (L_m^2 + m L_r k_{pll}) \\ b = L' [k_{pl} (L_s + m k_{pll}) - R_s L_r] \\ c = m k_{pl} R_s L_r L_s k_{pll}^2 L'^2 \\ d = (2a - b^2 - 1 + m k_{pl} L_s L'^2 k_{pll}^2) / 2b \\ e = (c - ab) / 2b \end{cases} \quad (A1)$$

$$\begin{cases} \delta = \omega_B \frac{d + \sqrt{d^2 - 4e}}{2} \\ \xi = \omega_B (a - b\delta) \end{cases} \quad (A2)$$

参考文献

- [1] 李生虎, 朱国伟. 基于特征结构分析的风电机组调频控制桨距角参数选择[J]. 太阳能学报, 2017, 38(3): 662-668.
LI S H, ZHU G W. Pitch angle adjustment to wind turbine generators for frequency regulation based on eigenvalue analysis[J]. Acta energiae solaris sinica, 2017, 38(3): 662-668.
- [2] 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 X F, OUYANG J X. 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.
- [3] 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.
- [4] 厉伟, 陈刚. 一种利用LabVIEW滤除衰减直流分量的改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 7-12.
- LI W, CHEN G. An improved algorithm to filter decaying DC component based on LabVIEW[J]. Power System protection and control, 2014, 42(11): 7-12.
- [5] 郑涛, 魏旭辉, 李娟, 等. PI控制参数对双馈风电机组短路电流特性的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 15-21.
ZHENG T, WEI X H, LI J, et al. Influence of PI control parameters on short circuit current characteristics of DFIG[J]. Electric power automation equipment, 2016, 36(7): 15-21.
- [6] 杨淑英, 周天保, 谢震, 等. 计及转子电流控制动态的双馈电机电磁暂态过程解析研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(8): 2136-2144.
YANG S Y, ZHOU T B, XIE Z, et al. Analytical study of electromagnetic transient process in DFIG involving rotor current control response[J]. Acta energiae solaris sinica, 2017, 38(8): 2136-2144.
- [7] 张金华, 张保会, 郝治国, 等. 故障后转子侧变流器不间断控制下的双馈风机序网等值电路[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 521-528.
ZHANG J H, ZHANG B H, HAO Z G, et al. Equivalent sequence circuit of DFIG wind turbines with uninterrupted control of rotor side converter after faults[J]. Power system technology, 2017, 41(2): 521-528.
- [8] KONG X, ZHANG Z, YIN X, et al. Study of fault current characteristics of the DFIG considering dynamic response of the RSC[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2014, 29(2): 278-287.
- [9] MARQUES G D, SOUSA D M. Understanding the doubly fed induction generator during voltage dips[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2012, 27(2): 421-431.
- [10] 李生虎, 王鹏飞, 朱国伟. 考虑双馈异步发电机转速限制的电网频率协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 82-87.
LI S H, WANG P F, ZHU G W. Coordinated grid frequency control strategy of doubly-fed induction generator considering its rotor speed constraints[J]. Power system protection and control, 2017, 45(18): 82-87.
- [11] 郭成, 李群湛, 贺建闽, 等. 电网谐波与间谐波检测的分段Prony算法[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 21-25.
GUO C, LI Q Z, HE J M, et al. Segmentation prony algorithm on harmonic and inter-harmonics detection of power networks[J]. Power system technology, 2010, 34(3): 21-25.

ANALYTICAL EXPRESSION OF DC COMPONENT OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS OF DFIG CONSIDERING RSC CONTROL

Li Shenghu¹, Wang Pengfei¹, Sun Qi¹, Wu Dong², Huang Jiejie¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Maintenance Department, Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300232, China)

Abstract: In existing literatures, the analytical expressions of the stator short circuit currents of the doubly fed induction generator (DFIG) considering the rotor side converter (RSC) control are derived either by assuming that the stator flux as the first order decaying DC component or by neglecting the outer-loop power control. Based on the voltage, flux-linkage equations of the DFIG and the RSC control equations, the stator current transfer functions concerning the stator power reference value and stator voltage is obtained, and then the accurate analytical expressions of the stator currents are derived. Based on the relationship between the PI parameters of the inner and outer loop control of the RSC, the decaying time constant and angular frequency of the decaying DC component analytical expressions about the proportional parameters are derived. The effects of the PI parameters of the inner and outer loop control to the RSC on the decaying DC components of the stator currents are analyzed. Simulations results verify the accuracy of the analytical expressions.

Keywords: wind power; short circuit currents; transfer functions; decaying DC component; rotor side converter; PI parameters; analytical expression