

电压暂降期间工业园区分布式风机转子电流 动态响应及其灵敏度分析

许中,莫文雄,马智远,周凯
(广州供电局有限公司,广东广州 510410)

摘要: 工业园区配置分布式风机是优化园区电源结构、节能减排的重要措施。并网电压暂降期间,工业园区的风机响应特性对园区电能质量呈负面影响。为提高风机低电压穿越能力,首先需定量揭示低电压过程中转子电流暂态特性及影响因素,找到影响低电压穿越能力的薄弱环节。在研究双馈感应发电机低电压过程中的暂态特性的基础上,建立双馈感应发电机暂态转子电流详细模型,将低电压穿越能力的影响因素按电机的结构参数和状态参数两类分别研究影响程度,通过轨迹灵敏度分析,定量揭示各因素的影响程度,为提高园区风力发电机低电压穿越能力提供理论支撑。

关键词: 双馈感应发电机;低电压穿越;转子暂态模型;电压暂降;轨迹灵敏度

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)01-0045-07

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.01.010

Rotor Current Dynamic Response and Sensitivity Analysis of Distributed Wind Turbine under Voltage Sag in Industrial Park

Xu Zhong, Mo Wenxiong, Ma Zhiyuan, Zhou Kai
(Guangzhou Electric Power Supply Bureau Co. Ltd., Guangzhou 510410, Guangdong, China)

Abstract: It is an important measure to optimize the structure of power supply, save energy and reduce emission in industrial park. The characteristics of wind turbine have a negative impact on power quality of the park under voltage sag. In order to improve low voltage ride through (LVRT) capability of doubly-fed induction generator (DFIG), it is necessary to focus on the rotor current transient characteristics and its influencing factors under symmetrical voltage sags. After the presentation of the transient characteristics of DFIG, the transient rotor current model is derived. The influencing degree of both structural and state parameters, such as stator resistance, rotor resistance and their inductance, the generator output power, slip ratio, and rotor side converter (RSC) output voltage, are studied in detail. By trajectory sensitivity analysis, the influence of each factor on the rotor current dynamic behavior is evaluated quantitatively, which can provide theoretical basis for the improvement of LVRT capability of DFIG.

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG); low voltage ride through (LVRT); rotor transient model; voltage sag; trajectory sensitivity

0 引言

现代电力系统中,风电渗透率越来越高,很多园区配置风力发电机组,自发自用实现节能减排。但电压暂降期间,风电机组的低电压穿越能力会影响园区敏感负荷的生产过程,整体对园区电能质量呈负面影响。提高风机低电压穿越能力,是提高园区

科技项目:南方电网科技项目《基于多功能变流装置的优质供电技术研究示范应用》(080037KK52160006)

生产稳定性的重要举措^[1-3]。

双馈感应发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)是当前风电的主流机型,当系统的风电渗透率较低时,风电机组采用撬棒保护,能有效保护机组^[4-5],但其对电网的支撑能力明显不足。风电机组的低电压穿越能力,主要指机组对电网故障引起的并网点电压暂降的穿越能力^[6]。根据磁链守恒原理,风电机组定子侧电压暂降时,定子磁链中的暂态直流分量以发电机转子的转速切割转子,产生感

应电动势、感应电流,使转子过电压、过电流。转子过电流经转子侧换流器输送到直流侧,导致直流侧电容过电压。同时,当机端电压突然减小时,机组输出功率减小,风机捕获的风能部分不能送入电网,致使转子加速,转差率增大,定子磁链暂态分量加速切割转子,使转子过电流和过电压更严重,导致机组低电压穿越能力进一步恶化。在此过程中,电磁转换和功率交换经历了一个暂态过程,因此,研究DFIG转子电磁响应特性,定量分析转子过电流和过电压的影响因素,是提高机组低电压穿越能力的关键。

近年来,国内外对DFIG低电压穿越开展了大量研究。理论研究主要集中于解释物理现象,为DFIG参数设计、控制策略制定提供支撑^[7-13]。文献[7]提出了不同电压暂降幅值下转子电压表达式。文献[8]给出了电压暂降时转子电压的瞬时最大值、电压恢复时转子侧电压瞬间的最大值与最小值的数学表达式。文献[9]在同步旋转坐标系下推导了定子电压中断时定转子暂态电流的表达式。文献[10]在忽略发生暂降时电流环响应时间和转子电压变化时,DFIG运行状态对转子电流的影响。文献[11]推导了三相故障时定子电流的解析表达式,并用于转子短路电阻的整定。文献[12-13]定性研究了部分风电机参数对转子电流的影响。研究证明,机组低电压穿越能力与转子电流暂态特性、电网状态特性等有关。遗憾的是,对转子暂态电流详细模型、影响因素定量刻画、各因素灵敏度等还缺乏深入、完整的研究。

下面基于园区发生电压暂降时,双馈感应发电机的动态物理过程和转子暂态特性,建立较完整的转子电流模型,分析转子电阻、转差率等结构参数以及定子侧电压暂降特征等状态参数对DFIG转子电流的影响,并通过各影响因素轨迹灵敏度分析,提出了量化各因素影响程度的方法,在合理解释现有技术措施的同时,为提高DFIG低电压穿越能力和改进控制策略提供了理论支撑。

1 转子电流模型

1.1 DFIG基本模型

三相静止坐标系下,DFIG系统是一个非线性、多变量、强耦合高阶系统^[14]。将DFIG转子侧参数

折算到定子侧,可得电压和磁链方程^[15]:

$$\begin{cases} v_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \\ v_r = R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} - j\omega_r \psi_r \end{cases} \quad (1)$$

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

式中:下标s、r分别表示定子、转子; v 、 i 、 ψ 、 R 分别为电压、电流、磁链和阻抗; L_s 、 L_r 和 L_m 为定子、转子和励磁电感。

由式(3)可得转子磁链:

$$\psi_r = \frac{L_m}{L_s} \psi_s - \sigma L_r i_r \quad (3)$$

式中, $\sigma = L_m^2 / L_r L_s - 1$ 。

将式(3)代入式(1),得转子电压:

$$v_r = \frac{L_m}{L_s} (p - j\omega_r) \psi_s + [R_r - \sigma L_r (p - j\omega_r)] i_r \quad (4)$$

式中, p 为微分算子。

由式(4)可见,转子电压由两项构成,第一项为定子磁链切割转子产生的转子感应电动势(electromotive force, EMF),随定子磁链变化^[8,16-17],可令:

$$E = \frac{L_m}{L_s} (p - j\omega_r) \psi_s \quad (5)$$

1.2 定子磁链方程

稳态条件下,DFIG定子电压以同步频率 ω_s 旋转,是幅值为 V_1 的空间矢量,可表示为^[16]

$$v_s = V_1 e^{j\omega_s t} \quad (6)$$

结合式(1),忽略通常很小的定子电阻 r_s ,可得定子磁链表达式^[16-17]为

$$\psi_s = \frac{V_1}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} = \psi_{s1} \quad (7)$$

假设在 $t = t_0$ 时刻电网发生对称性电压暂降,定子磁链不能突变,会产生暂态直流分量 ψ_{st} ,定子磁链为^[7]

$$\psi_s = \begin{cases} \psi_{s1} = \frac{V_1}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} & t < t_0 \\ \psi_{s12} + \psi_{st} = \frac{V_2}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} + \left(\frac{V_1}{j\omega_s} - \frac{V_2}{j\omega_s} \right) e^{j\omega_s t_0 - (t-t_0)/\tau_s} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: ψ_{s1} 、 ψ_{s12} 、 V_1 、 V_2 分别为定子磁链、电压,下标

1、2 表示暂降“前、后”； $\tau_s = \frac{L_r L_s - L_m^2}{L_r R_s}$ 为定子磁链衰减时间常数^[13]。

1.3 转子电流模型

稳态情况下, 机组采用有功、无功解耦矢量控制^[18-19] 输出功率为

$$\frac{3}{2} v_s (i_s)^* = P_s + jQ_s \quad (9)$$

将式(2)代入式(9) 得转子电流表达式(10)为

$$i_r = \frac{2L_s}{3L_m} \left(\frac{P_s}{v_s} + j \frac{Q_s}{v_s} \right)^* - j \frac{v_s}{\omega_s L_m} \quad (10)$$

将式(7)、式(10)代入式(4) 得转子侧换流器 (rotor side converter, RSC) 输出电压 v_r :

$$v_r = s \frac{L_m}{L_s} v_s + (R_r + j\sigma L_r \omega_r) i_r - \sigma L_r \left[\frac{2L_s}{3L_m} \left(\frac{P_s}{V_s} + j \frac{Q_s}{V_s} \right)^* j\omega_s - \frac{v_s}{L_m} \right] \quad (11)$$

在暂态情况下, 将式(4)、式(5)化为一阶常系数微分方程形式, 得

$$\frac{di_r}{dt} - \left(\frac{R_r}{\sigma L_r} + j\omega_r \right) i_r = \frac{(E - v_r)}{\sigma L_r} \quad (12)$$

式中, ω_r 为转子旋转角频率。

将式(8)代入式(12), 解微分方程得对称暂降下转子电流模型:

$$i_r = \frac{1}{L} [sV_2 e^{j\omega_{s1}t} \frac{1}{j\omega_s + 1/\tau_r} - (1-s) \cdot (V_1 - V_2) e^{j\omega_{s1}t - (t-t_0)(1/\tau_s + j\omega_r)} \frac{1}{1/\tau_r - 1/\tau_s - j\omega_r}] + K e^{-(t-t_0)/\tau_r} - \frac{v_r}{\sigma L_r (1/\tau_r - j\omega_r)} e^{-j\omega_r t} \quad (13)$$

式中 τ_r 为转子衰减时间常数。

$$\tau_r = -\frac{\sigma L_r}{R_r} = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s R_r} \quad (14)$$

$$L = \frac{L_m^2 - L_r L_s}{L_m} \quad (15)$$

$$\omega_{s1} = \omega_s - \omega_r \quad (16)$$

$$K = i_r(t_0) - \frac{sV_2 e^{j\omega_{s1}t_0}}{(j\omega_s + 1/\tau_r) L'} + \frac{(1-s)(V_1 - V_2) e^{j\omega_{s1}t_0}}{(1/\tau_r - 1/\tau_s - j\omega_r) L'} + \frac{v_r(t_0)}{(1/\tau_r - j\omega_r) \sigma L_r} \quad (17)$$

2 转子电流影响因素

提高 DFIG 低电压穿越能力的目标之一是抑制转子过电流, 并加速衰减^[4-19]。由式(13)可见, 影响 DFIG 转子过电流的因素包括: 定子、转子的电阻、电感等机组结构参数; 机组输出有功、无功、转差率以及转子换流器输出电压等状态参数。

2.1 定子电阻 R_s 的影响

图1给出了定子电阻分别取 0.0071 p.u.、0.05 p.u.、0.71 p.u. 时, 定子磁链和转子电流波形。由图1可见, 定子电阻越大, τ_s 越小, 定子磁链中暂态直流分量衰减越快, 利于转子过电流衰减。

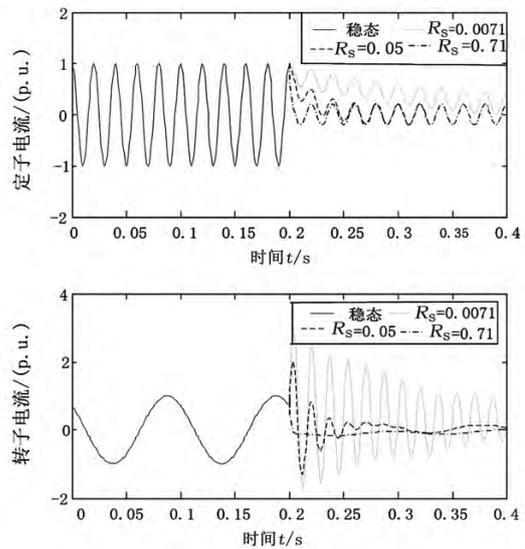


图1 定子电阻 R_s 的影响

2.2 转子电阻 R_r 的影响

增大转子电阻, 在减小转子电流的同时, 也减小了转子时间常数, 可加快转子过电流衰减, 如图2所示。由图2可见, 增大转子电阻可有效抑制转子过电流。

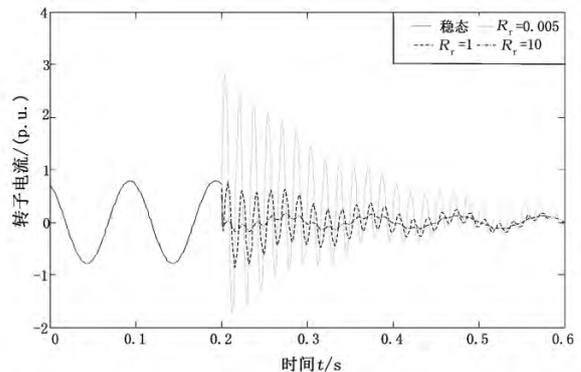


图2 转子电阻的影响

2.3 电感参数的影响

电感参数不仅是转子电流表达式的分母项,同时对定子和转子时间常数也有影响。转子电阻的影响如图3所示。由图3可见,暂降期间增大定子、转子漏感,减小励磁电感有利于抑制转子电流幅值。

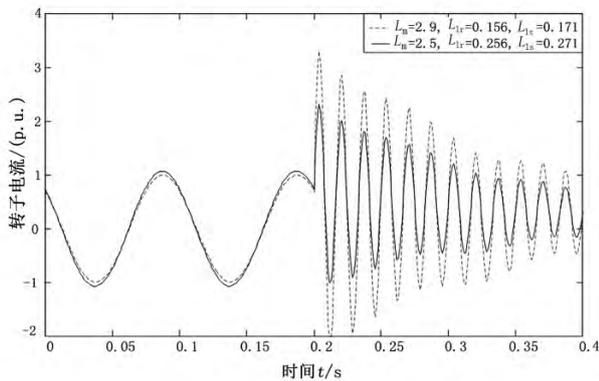


图3 不同电感参数下转子电流

2.4 机组送输出功率的影响

不同输出功率条件下转子电流如图4所示,机组送出有功和无功功率越大,转子电流稳态值也越大。式(13)左侧 i_r 越大,意味着右侧的衰减项 Ke^{-t/τ_r} 、 $e^{-j\omega_r t}$ 也越大,转子过流越严重。

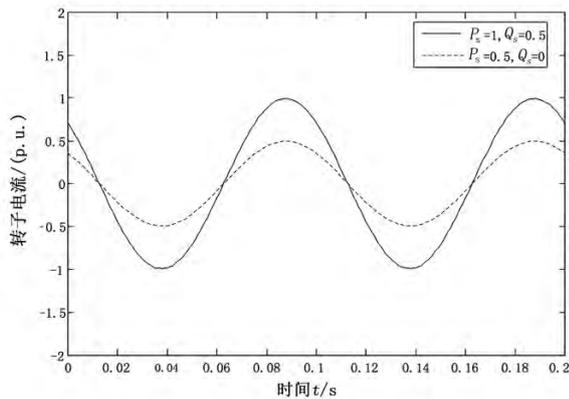


图4 不同输出功率条件下转子电流

2.5 转差率s的影响

不同转差率下转子电流如图5所示。图5给出了机组不同转差率下,转子电流变化特性。发生电压暂降时,机组处于超同步转速状态,产生的转子过电流高于次同步转速状态。由图可见,转子转速越高,转子电流幅值越大。

2.6 转子换流器输出电压的影响

转子侧换流器(RSC)输出电压主要取决于RSC的容量大小和DFIG励磁控制策略,反映了控制策略对转子过流的控制作用。不同RSC输电电压下转子电流如图6所示,RSC输出电压的调节范围

越宽,对转子过流的控制效果越好。

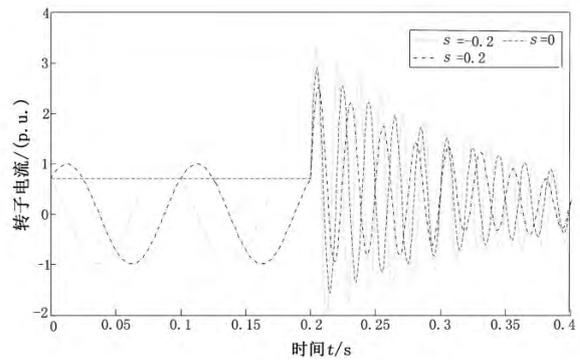


图5 不同转差率下转子电流

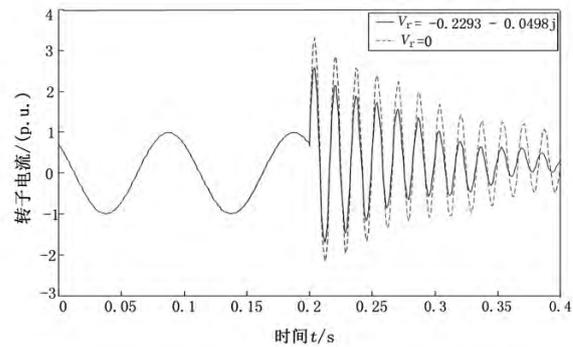


图6 不同RSC输出电压下转子电流

3 各影响因素的轨迹灵敏度

由上可见,机组结构参数、状态参数等是影响转子过电流和机组低压穿越能力的主要因素。为了进一步揭示各因素的影响程度,可用轨迹灵敏度分析法进行分析。

轨迹灵敏度能刻画各影响因素微小变化引起的转子电流动态变化程度的轨迹^[20-21]。通过转子电流轨迹灵敏度分析,可找出导致穿越能力低的薄弱环节。

转子电流轨迹灵敏度定义为

$$S_i = \frac{\partial i_r(t, \theta_i)}{\partial \theta_i} = \lim_{\Delta \theta_i \rightarrow 0} \frac{i_r(t, \theta_{i0} + \Delta \theta_i) - i_r(t, \theta_{i0})}{\Delta \theta_i} \quad (18)$$

式中: i_r 为转子输出电流; θ_i 为影响因素, i 取不同值代表不同的影响因素; $\Delta \theta_i$ 为各影响因素相对改变量; t 为时间。

由式(18)可求各影响因素的轨迹灵敏度。若某段时间内,影响因素 θ_i 的轨迹灵敏度较大,说明该因素对转子电流的影响较大。因此,根据轨迹灵

敏度可直观地识别影响低压穿越能力的主要因素。

为了从总体上度量低压穿越能力受影响的程度,可用各影响因素的平均轨迹灵敏度判别各因素的影响程度。平均灵敏度越大,对穿越能力的影响越大。影响因素 θ_i 的平均灵敏度 s_{ai} 定义为轨迹灵敏度绝对值的平均值^[22]:

$$s_{ai} = \frac{1}{K_i} \sum_{k=1}^{K_i} \left| \frac{\partial i_r(k, \theta_i)}{\partial \theta_i} \right| \quad (19)$$

式中, K_i 为选取的某时间段内影响因素 θ_i 轨迹灵敏度上特征点的总个数,一般时间段的长短以暂降持续时间和转子电流衰减时间为依据,步长大于该信号的采集周期。

4 算例分析

根据DFIG状态方程^[23],用四阶龙格-库塔法得电压暂降20%时转子电流结果。设暂降发生后转子侧换流器被隔离,输出电压为0,风电机组的基本参数如表1。采用摄动法^[24]求得机组结构和状态参数的轨迹灵敏度(变化幅度10%),如图7、图8所示。

表1 仿真模型发电机基本参数

基本参数	仿真取值	基本参数	仿真取值
额定功率 P_n /MW	1.5	额定电压 V_n /V	575
额定频率 f /Hz	50	励磁电感/(p.u.)	2.9
定子漏感/(p.u.)	0.171	转子漏感/(p.u.)	0.156
定子电阻 R_s /(p.u.)	0.007 1	转子电阻/(p.u.)	0.005

注:若无特殊说明,所用参数均为标么值。基准为:1.5 MW, 575 V。

转子侧换流器输出电压、有功功率、无功功率和励磁电感的轨迹灵敏度在暂降发生瞬间最大,并随转子电流衰减,趋于稳定值。因定子、转子磁链暂态分量呈指数衰减,定子、转子的电阻、漏感及转差率的灵敏度先随转子电流衰减增大,当转子电流衰减放缓时达最大,然后逐渐减小。对比图7(b)、图7(c)可见,暂态过程中,定子、转子电阻和转差率的轨迹灵敏度远大于其他参数,说明该时段内,转子电流主要受这3个因素影响。

可见,随暂降幅值减小,定子电阻平均灵敏度下降,漏感平均灵敏度上升。转子电阻、转差率、RSC输出电压、有功和无功功率的平均灵敏度不明显地

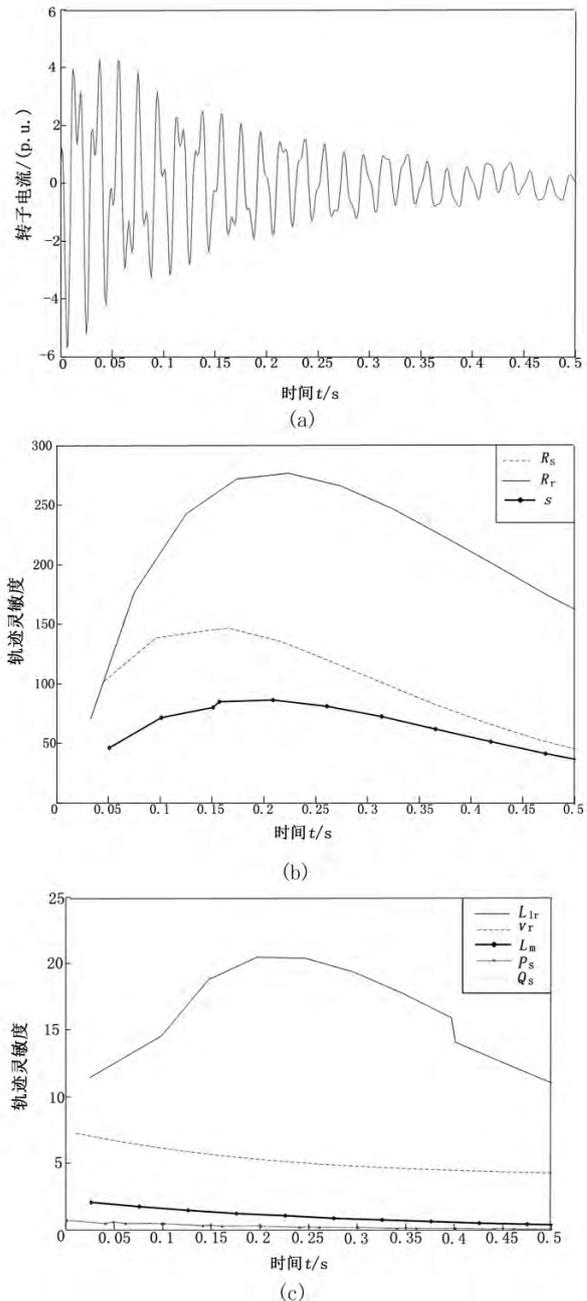


图7 结构与状态参数轨迹灵敏度

受暂降幅值影响。

从参数变化幅度对应的转子电流变化幅度看,以并网规程中通常规定的较严重的暂降幅值20%为例,转子电阻变化0.000 5 p.u.和RSC输出电压变化0.02 p.u.对应的转子电流变化量为0.11 p.u.和0.1 p.u.,可见,调整转子电阻和RSC输出电压可起到抑制转子电流的作用。

5 结 语

为提高双馈感应发电机低压穿越能力,定量分

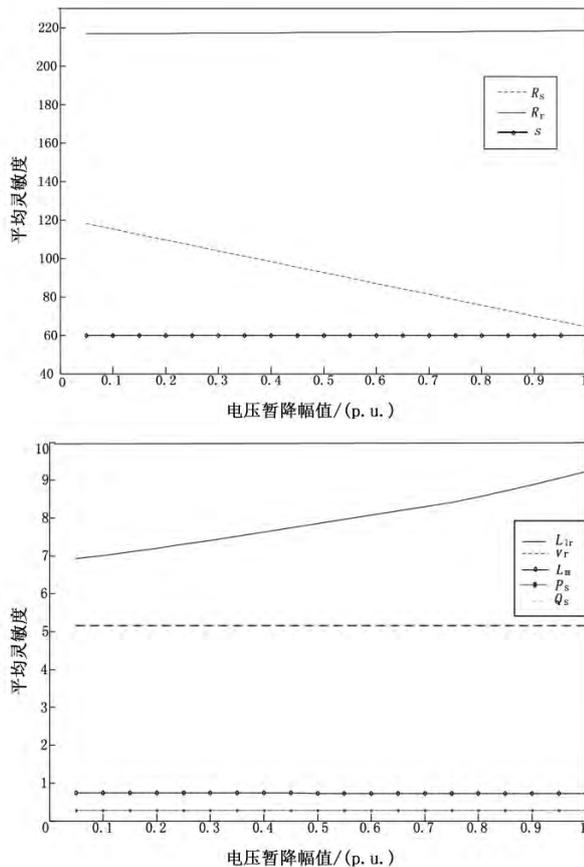


图8 不同暂降幅值下结构和状态参数平均灵敏度

析其影响因素,建立了机组转子电流详细模型,通过各因素轨迹灵敏度和平均灵敏度分析,定量揭示了影响DFIG低压穿越能力的主要因素,为改进和提高机组低压穿越能力提供理论依据。理论研究和仿真证明,定子磁链暂态分量是影响LVRT的主要原因,其衰减速度和幅值与定子电阻相关;调整定子电阻、转子电阻、RSC输出电压、转差率等能有效抑制转子电流,提高机组低压穿越能力,同时,电机漏感的影响值得重视。

所提出的转子电流模型和轨迹灵敏度分析方法,有助于提高DFIG低压穿越能力,可为发电机设计和控制策略制定提供参考。目前还仅分析了对称暂降下的模型和影响因素,不对称暂降是下一步值得研究的问题。

参考文献

[1] Abbey C, Joos G. Effect of Low Voltage Ride Through (LVRT) Characteristic on Voltage Stability [C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, San Francisco, CA, 2005: 1901 - 1907.

[2] Iñigo Martinez de Alegría, Jon Andueña, José Luis Martínez, et al. Connection Requirements for Wind Farms: A Survey on Technical Requirements and Regulation [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11 (8): 1858 - 1872.

[3] Mohseni M, Islam S, Masoum M. A. S. Low Voltage Ride-through Requirements at the PCC Versus Wind Generator Terminals [C]//20th Australasian Universities Power Engineering Conference, Christchurch, New Zealand, 2010: 1 - 6.

[4] 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.

[5] 朱颖, 李建林, 赵斌. 双馈型风力发电系统低电压穿越策略仿真 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30 (6): 20 - 24.

[6] 张兴, 张龙云, 杨淑英, 等. 风力发电低电压穿越技术综述 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20 (2): 1 - 8.

[7] Jesus Lopez, Pablo Sanchis, Xavier Roboam, 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.

[8] 黎芹, 张兴, 杨淑英, 等. 双馈风力发电机低电压穿越转子动态过程分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22 (5): 19 - 24.

[9] Vicatos M S, Tegopuio J A. Transient State Analysis of A Doubly-fed Induction Generator under Three Phase Short Circuit [J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 1991, 6 (1): 62 - 68.

[10] 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 - 90.

[11] 张建华, 陈星莺, 刘皓明, 等. 双馈风力发电机三相短路分析及短路器最大电阻整定 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (4): 6 - 10.

[12] Aoyang Han, Zhe Zhang, Xianggen Yin, et al. Study of the Factors Affected the Rotor Over-current of DFIG during the Three phase Voltage Dip [C]//Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Technologies Power, Nanjing, China, 2008: 2647 - 2652.

[13] 李辉, 赵猛, 叶仁杰, 等. 电网故障下双馈风电机值暂态电流评估及分析 [J]. 电机与控制学报, 2010, 14 (8): 45 - 51.

[14] 申洪. 变速恒频风电机并网运行模型研究及其应

用[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2003.

[16] Morren J, de Haan, S W H. Short-circuit Current of Wind Turbines with Doubly Fed Induction Generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 174-180.

[17] Sheng Hu, Xinchun Lin, Yong Kang, 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.

[18] 杨淑英. 双馈型风力发电变流器及其控制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.

[19] 胡家兵. 双馈异步风力发电机系统电网故障穿越(不间断)运行研究——基础理论与关键技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.

[20] 刘洪波, 穆钢, 严干贵, 等. 根据量测轨迹计算轨迹灵敏度的卷积法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5): 13-17.

[21] 陈建华, 吴文传, 张伯明, 等. 一种基于轨迹灵敏度的发电机参数抗差估计法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(23): 21-24.

[22] 韩睿, 郑竞宏, 朱守真, 等. 基于灵敏度分析的同步发电机参数分步辨识策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 74-80.

[23] 张俊峰, 毛承雄, 陆继明, 等. 双馈感应发电机的直接功率控制策略[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(4): 31-35.

[24] Stephen M Benschluch, Joe H Chow. A Trajectory Sensitivity Method for the Identification of Nonlinear Excitation System Models [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(2): 159-164.

作者简介:

许中(1986), 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统与电能质量;

莫文雄(1971), 硕士研究生, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统与电能质量;

马智远(1987), 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电能质量;

周凯(1993), 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量与用电技术监督。

(收稿日期: 2019-11-25)



(上接第 11 页)

以上数据表明: 采用差值补偿法的计算结果与采用《电力工程高压送电线路设计手册》^[6]线长计算公式的计算结果吻合较好, 计算结果的最大偏差不超过 4.5%。

4 结 语

经过实践验证, 依照基于线性拟合和差值补偿法的 1000 kV 特高压交流输电线路跳线安装设计方法进行单回路跳线设计, 有效地简化了设计流程, 减少了 40% 设计时间, 对减少重复计算时间也具有实际意义。

参考文献

[1] 尹泉军, 崔志国, 付明翔, 等. 1000 kV 特高压交流输电线路跳线安装施工技术 [J]. 河北电力技术, 2012(10): 23-26.

[2] 付克勤, 古祥科, 张雄, 等. 500 kV 输电线路风偏特性的有限元分析[J]. 广东电力, 2017, 30(2): 123-128.

[3] 邵天晓. 架空送电线路的线力学计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 2003.

[4] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程通用设计 1000 kV 输电线路分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.

[5] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程通用设计 1000 kV 输电线路金具分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.

[6] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

作者简介:

李铁鼎(1987), 工程师, 主要从事高压输电线路设计研究工作;

雷雨泽(1991), 工程师, 主要从事高压输电线路设计研究工作;

程述一(1986), 高级工程师, 主要从事特高压输电线路设计、研究与管理的工作;

刘文勋(1982), 高级工程师, 主要从事高压输电线路设计研究工作;

周古月(1992), 工程师, 主要从事高压输电线路设计研究工作。

(收稿日期: 2019-10-24)