

一种适用于大型风电场实时仿真的双馈风力发电机响应模型

龚文明^{1,2,3}, 胡书举^{2,3}, 许洪华^{2,3}

(1. 中国科学院大学, 北京 100190; 2. 中国科学院 电工研究所, 北京 100190;

3. 中国科学院 风能利用重点实验室, 北京 100190)

摘要: 提出了一种基于动态响应的双馈发电机响应模型。由于使用代数运算取代微分方程迭代求解, 使得模型计算量大为减少, 可用于风电场的实时仿真与风电场控制器的硬件在环测试。该响应模型根据电网电压条件将双馈电机的运行分为正常运行与故障运行 2 种状态; 正常运行时, 定、转子输出电流能够很好地跟踪指令值, 因此可以将电机等效为一个时间常数很小的惯性环节; 电网电压发生跌落故障时, 电机的定、转子上将出现较大的冲击电流。基于磁链不能突变的原理, 研究了故障前运行状态、电机参数、撬棒阻值等对故障电流的影响, 得到了双馈发电机定、转子故障电流的近似解析表达式。通过与常规 4 阶模型的对比仿真, 验证了响应模型的正确性。

关键词: 风力发电; 双馈感应发电机; 低电压穿越; 响应模型; 撬棒电阻; 风电场

中图分类号: TM 743; TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.020

0 引言

随着风电场穿透功率的不断增大, 并网风电对电力系统的影响越来越大。因此研究整个风电场与电网的相互作用及其相应的控制策略已成为当前的一个研究热点。并网风电场对电网的影响表现在电压和频率稳定性、有功无功负荷平衡、谐波污染等方面。其中最为突出的是低电压穿越(LVRT)问题, 各国相继颁发的风电并网标准都对此作了详细考虑。纵观这些标准, 有 2 个主要考虑的问题: 正常运行条件下的有功、无功控制能力; 电网电压跌落时的 LVRT 能力^[1-2]。

不同于传统发电厂, 风电场一般由许多相似的分布式发电单元组成, 远离负荷中心, 其调度受风资源波动、分布式系统通信延时的影响较大。因而在风电并网及其 LVRT 研究中, 应当对整个风电场进行适当的建模^[1], 并从风电机组运行、控制技术等方面研究并网风电对电力系统故障电流和继电保护等的影响^[3]、风电场故障连锁反应^[4]、无功协调控制^[5]等。针对某种具体机型, 大型生产厂商一般能够提供较为精确的模型用于仿真计算, 然而这些模型往往需要较多的定制化输入参数, 不适合一般用户; 其所需计算资源也较为庞大, 难以用于大型风电场的仿真。因此, 国际电气技术委员会 IEC TC88 WG27 工作组正在倡导制定更具通用性的风电机组仿真模型, 以便

用于电力系统稳定性研究^[6]。其目标模型要求能够反映系统短路比、电网频率/电压波动以及工作点变化等给电力系统稳定性带来的影响; 而可以忽略的部分包括电力电子开关器件的高频暂态过程以及具体的控制策略等^[7]。

现代大型风电场的发电单元一般由变速恒频风力发电系统组成, 其中以双馈型风电机组为主。在此类风电场的研究中, 双馈机组模型的选择很重要。一方面模型必须具有足够的精度, 以准确反映风电机组的动、静态特性以及机组的控制策略, 从而为电力系统稳定性分析提供可靠依据; 另一方面模型应当根据具体问题的需要做到尽量简化、精巧, 以便提高计算效率。

双馈风电系统的模型可以分为电气和机械两部分分别讨论。对于前者, 在目前有关双馈风电系统的研究中, 普遍使用 4 阶 T 型等效电路模型(以下简称 4 阶模型), 可以获得较高精度的计算结果^[8], 在一些商用软件中也采用了类似的模型^[9]。但是随着风电机组数目的增加, 风电场模型的阶数与计算量将急剧增加, 难以应用于大规模风电场的研究中。因此, 一些文献和软件采用了简化的降阶模型, 例如 PSAT 就直接采用了代数方程表示双馈发电机^[10], 而 PSASP 通过忽略定子动态过程而得到 2 阶电气模型^[11-12]。文献^[13]采用动态相量模型, 将 4 阶模型的计算时间缩短了一半。文献^[14-15]详细研究了模型简化和相关参数对风力发电机组动态特性及电网的影响。

在以上有关双馈风电机组电磁模型的简化研究中, 一般都是基于对其动态方程组进行简化的思想,

收稿日期: 2013-04-29; 修回日期: 2014-01-24

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011-AA050204)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2011-AA050204)

往往需要在计算精度与计算效率之间进行权衡。本文详细研究了双馈风电机组在电网电压跌落时的控制策略及其响应特性,得到了定、转子故障电流的解析表达式,并据此提出了一种基于动态响应特性的建模方法。通过与4阶模型计算结果的对比,证明该方法能够以很小的精度损失获得计算效率的大幅度提升。仿真结果表明该建模方法可以用于风电场并网研究中。

1 双馈感应发电机等效电路模型

1.1 双馈感应发电机数学模型

目前已有大量文献论述了双馈电机的稳态模型。在同步旋转坐标系下,采用电动机惯例,将转子侧电压、电流折算到定子侧,双馈电机的等效电路可表示为图1所示形式。

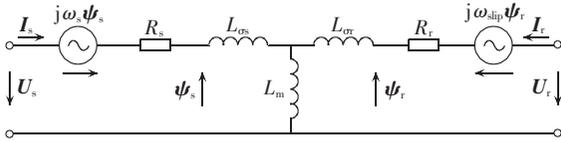


图1 双馈风力发电机组示意图
Fig.1 Diagrammatic sketch of DFIG
with wind turbine

其磁链和电压动态方程为:

$$\begin{cases} \psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \psi_r = L_m I_s + L_r I_r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_s \psi_s \\ U_r = R_r I_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j\omega_{slip} \psi_r \end{cases} \quad (2)$$

$$\omega_{slip} = \omega_s - \omega_r \quad (3)$$

其中, U 、 I 、 ψ 分别表示电压、电流和磁链矢量; L 、 R 分别为电感和电阻; ω 为角速度;下标s表示定子侧物理量;下标r表示转子侧物理量;下标m表示励磁分量; $L_s = L_{\sigma s} + L_m$, $L_r = L_{\sigma r} + L_m$,实际中定子漏感 $L_{\sigma s}$ 、转子漏感 $L_{\sigma r}$ 远小于互感 L_m 。

1.2 电网电压故障时的暂态分析

双馈电机在理想电网的情况下具有良好的控制性能,而当电网电压或定子端电压急剧跌落时,将在定子侧产生很大的电流,并且耦合到转子侧,产生转子过电流、过电压或变流器直流母线过电压,严重时损坏电力电子变流器。目前广泛应用的LVRT技术,主要有2个方向:一是对控制策略进行改进,其主要思路是通过提高转子变流器的电压,来增强控制能力或提供无功支持,适用于电压跌落程度较浅的情况;二是当电压跌落程度较深时可投入撬棒(Crowbar)电路,起到限制转子电流、保护变流器的作用^[16-17]。由于三相对称电压跌落引起的过电流最为严重,对电网的影响也最大,因此本文重点针对此

种情况进行分析。

根据磁链方程很容易得到定、转子电流关系:

$$\begin{cases} I_s = \frac{\psi_s}{L'_s} - k_r \frac{\psi_r}{L'_s} \\ I_r = \frac{\psi_r}{L'_r} - k_s \frac{\psi_s}{L'_r} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $k_s = L_m / L_s$; $k_r = L_m / L_r$; $L'_s = \sigma L_s$; $L'_r = \sigma L_r$; $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ 。将式(4)代入电压方程(2)得到:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_s \psi_s + \frac{R_s}{L'_s} \psi_s - k_r \frac{R_s}{L'_s} \psi_r = U_s \\ \frac{d\psi_r}{dt} + j\omega_{slip} \psi_r + \frac{R_r}{L'_r} \psi_r - k_s \frac{R_r}{L'_r} \psi_s = U_r \end{cases} \quad (5)$$

只要再给出适当的边界条件便可以求出磁链和电流。假设在 t_0 时刻,电网电压由 U_0 变为 $(1-p)U_0$,初始相位为 0° ,定子直接和无穷大电网相连,则可有边界条件:

$$\begin{cases} \psi_s(0^-) = \psi_s(0^+) \\ U_s(0^-) = U_{s0} = U_s e^{j\omega_s t} |_{t=0^-} \\ U_s(0^+) = (1-p)U_{s0} = (1-p)U_s e^{j\omega_s t} |_{t=0^+} \end{cases} \quad (6)$$

电压跌落的时间一般很短,远小于转子机械时间常数,因而忽略转子转速变化。电压跌落时,磁链不能发生突变,因此将在定转子中产生衰减的直流分量,并过渡到新的稳态,即定、转子瞬态磁链中都将包含稳态分量和直流衰减分量。电压跌落时的电压、磁链矢量图如图2所示^[18-20]。其中定子电压定向于d轴,各分量解释如下。

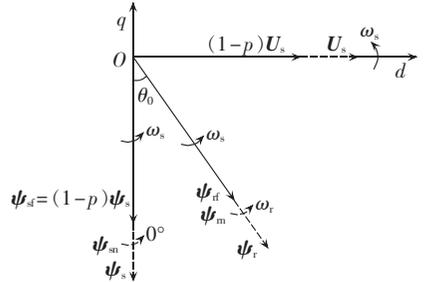


图2 电压跌落时的电压、磁链矢量图
Fig.2 Vector charts of voltage and flux during voltage dip

a. 稳态分量:以同步速旋转的新的定转子磁链稳态分量 ψ_{sf} 和 ψ_{rf} 。

b. 定子直流分量:故障发生后 ψ_m 相对于定子静止不动,由于转子以 ω_r 的电角速度旋转,因此该分量将在转子绕组中感应出频率为 $-(1-s)\omega_s$ 的磁链,其中s为滑差。

c. 转子直流分量:故障发生后 ψ_m 相对于转子静止不动,即以 ω_r 的电角速度旋转,同时在定子绕组中将感应出频率为 $-s\omega_s$ 的磁链。

由于定、转子的相对运动,将会产生出更多的暂态磁链分量,增加了分析的难度,但这些分量一般都

较小,忽略后不会产生很大的误差。

从以上分析可以得到方程组(5)、(6)的近似解析解^[18]:

$$\begin{cases} \psi_s = \psi_{st} + \psi_{sn} = \frac{U_s}{j\omega_s} [(1-p)e^{j\omega t} + pe^{-t/\tau'_s}] \\ \psi_r = \psi_{rt} + \psi_{rm} = \psi_{rt} e^{j\omega t} + (\psi_{r0} - \psi_{rt}) e^{j\theta_0} e^{j\omega t} e^{-t/\tau'_r} \end{cases} \quad (7)$$

$$\tau'_s = \frac{L'_s}{R_s}, \quad \tau'_r = \frac{L'_r}{R_r + R_c} \quad (8)$$

其中, τ'_s 、 τ'_r 分别为定、转子时间常数; R_c 为撬棒电阻。

为了进一步确定故障后磁链与电流的解析表达式,还需要确定转子边界条件。电压跌落发生后,短路电流迅速上升,触发撬棒电路,由于该时间间隔很小,因此可以看作故障发生后,DFIG 即工作于感应异步电机状态。

$$\psi_{r0} = \frac{U_r}{j\omega_r} = k_s \frac{U_s}{j\omega_s} e^{j\omega t} \quad (9)$$

$$-(R_r + R_c)I_{rf} = j\omega_{slip}\psi_{rf} \quad (10)$$

由式(4)、(10)可得:

$$\psi_{rf} = \frac{k_s(R_r + R_c)}{R_r + R_c + jL'_r\omega_{slip}} \psi_{st} = k_z k_s \psi_{st} e^{j\omega t} \quad (11)$$

将式(9)、(11)代入式(7),并联立式(4),解得:

$$\begin{cases} I_s = \frac{U_s}{j\omega_s L'_s} \{ (1 - k_r k_s k_z) (1 - p) e^{j\omega t} + p e^{-t/\tau'_s} - \\ (1 - \sigma) [1 - k_z (1 - p)] e^{j\theta_0} e^{j\omega t} e^{-t/\tau'_r} \} \\ I_r = \frac{U_s}{j\omega_s L'_r} \{ k_s (k_z - 1) (1 - p) e^{j\omega t} - k_s p e^{-t/\tau'_s} + \\ k_s [1 - k_z (1 - p)] e^{j\theta_0} e^{j\omega t} e^{-t/\tau'_r} \} \end{cases} \quad (12)$$

上式中包含了电机作感应机运行时的稳态分量 and 定、转子因短路而产生的直流衰减分量(相对于各自静止坐标系)。当 $k_z=1$, 即同步速的情况下,式(12)退化为与文献[18]中所得结果一致的形式。

应当注意的是,近似解式(7)假设定转子电阻很小^[18],这对于通常的双馈电机是适用的。但是随着撬棒电阻值的增大,式(12)的计算结果将会出现较大的误差^[20]。撬棒电阻的影响主要表现为如下 2 个方面。

a. 改变暂态分量衰减时间常数。随着 R_c 的增大,部分暂态电流加快衰减(主要对应于转子项);另一部分暂态电流的衰减速度却减慢(主要对应于定子项),其时间常数远大于前者,从而主导了暂态过程。前者可用电流源特性解释,即由于电流不能突变,较大的撬棒电阻意味着更快的消耗;后者可用电压源特性解释,即随着撬棒电阻的增大而增加了转子反电动势,从而使定子暂态电流得以保持更长时间。

b. 限制暂态电流幅值。定、转子暂态电流均随着撬棒电阻的增大而减小。

考虑以上 2 个因素,本文给出式(12)的简化公

式,较文献[20]中所给的定、转子电流计算公式更加简洁:

$$\begin{cases} I_s = \frac{U_s}{j\omega_s L'_s} (1 - k_r k_s k_z) (1 - p) e^{j\omega t} + \frac{U_s}{R_c + j\omega_s L'_s} \times \\ \{ p e^{-t/\tau'_s} - (1 - \sigma) [1 - k_z (1 - p)] e^{j\theta_0} e^{j\omega t} e^{-t/\tau'_r} \} \\ I_r = \frac{U_s}{j\omega_s L'_r} k_s (k_z - 1) (1 - p) e^{j\omega t} + \frac{U_s}{R_c + j\omega_s L'_r} \times \\ \{ -k_s p e^{-t/\tau'_s} + k_s [1 - k_z (1 - p)] e^{j\theta_0} e^{j\omega t} e^{-t/\tau'_r} \} \end{cases} \quad (13)$$

$$\tau'_a \approx \left(1 + k_c \frac{R_c}{R_s + R_r} \right)^2 \tau'_s, \quad \tau'_b \approx \tau'_r \quad (14)$$

τ'_a 与 R_c 存在非线性关系,通过反复对比仿真,本文取 $k_c=0.2$ 作为经验值^[17-18]。另外,当电压恢复时,可以视作负电压跌落,即 $p < 0$ 。投入撬棒后,DFIG 需要从电网吸收大量感性无功功率,不利于电网电压恢复,因此一般需要在过渡过程结束后及时退出,设计良好的控制策略可以消除此时的过流。

1.3 基于故障响应的双馈电机模型

1.2 节中根据磁链在电压跌落过程中不能突变的原理推导出了双馈电机故障电流的解析表达式,本节据此建立基于故障响应的双馈电机模型(以下简称响应模型),如图 3 所示。

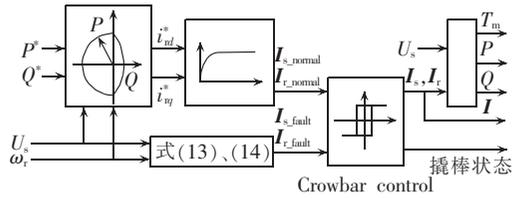


图 3 基于故障响应的双馈发电机模型示意图

Fig.3 Diagrammatic sketch of DFIG model based on response to fault

该模型的输入为功率给定、定子电压、转速,输出为机械转矩、有功功率、无功功率、电流、撬棒状态等。由功率给定计算得到转子电流给定。为了防止转子过流,设置了限幅环节,并可以选择优先满足有功或者无功指令要求(限于篇幅,本文对此不作详细讨论)。在正常情况下,用一个惯性环节模拟变流器的输出特性,得到稳态时的定子电流 I_{s_normal} 、转子电流 I_{r_normal} 。同时根据式(13)计算短路电流 I_{s_fault} 、 I_{r_fault} 。如果转子短路电流大于限定值,则变流器发生闭锁,启动撬棒,即“Crowbar control”模块输出电流为故障电流,否则切换到正常稳态电流。为了防止抖振,切换时采用滞回控制。最后根据定、转子电流和定子电压计算出转矩和输出功率。

2 仿真分析

为了检验该模型的效果,本文利用 MATLAB/Simulink 分别建立了该响应模型以及 4 阶模型,用于对比分析。主要参数如下:互感 $L_m=4$ p.u., 定子电压

$U_s=1$ p.u., 定子电感 $L_s=4.04$ p.u., 定子电阻 $R_s=0.01$ p.u., 转子电感 $L_r=4.06$ p.u., 转子电阻 $R_r=0.021$ p.u., 额定滑差 $s=-0.2$ p.u., 撬棒电阻 $R_c=(0\sim 80)R_r$ 。

2.1 最大故障电流

图 4、图 5 中分别用描线、描点表示了响应模型和 4 阶模型的计算结果(纵轴变量为标么值,后同)。从图中可见,随着电压跌落深度的增加或者撬棒阻值的减小,定子故障电流的最大值呈增加趋势。在图 5 中,还测试了响应模型对电机参数变化的敏感性。通过比较可以发现,响应模型能够得到较高的预测精度,其误差在可接受的范围内。

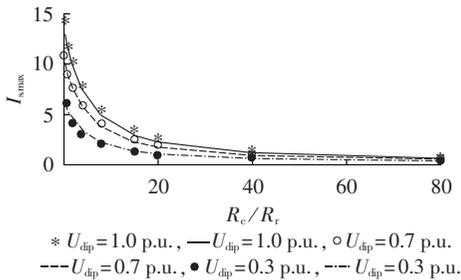


图 4 不同电压跌落深度下定子故障电流最大值随撬棒阻值变化曲线

Fig.4 Curves of maximum stator fault current vs. Crowbar resistance for different voltage dips

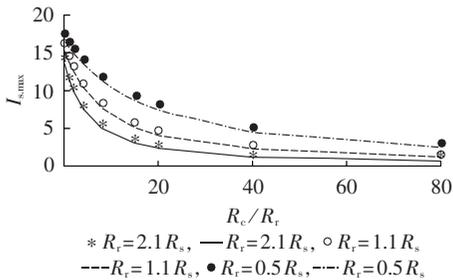


图 5 不同转子电阻时定子故障电流最大值随撬棒阻值变化曲线

Fig.5 Curves of maximum stator fault current vs. Crowbar resistance for different rotor resistances

2.2 衰减时间常数

撬棒电阻不仅影响故障电流最大值,还会改变其衰减时间常数。如图 6 所示,较大的撬棒电阻值延长了暂态过程。响应模型能够较好地反映这一变化关系。

2.3 并网仿真

图 7、图 8 为将响应模型和 4 阶模型接入一简单电网后的仿真结果。线路阻抗为 $0.001 + j0.02$ p.u.。在 $t=1$ s 时刻,电压跌落 50%,并于 $t=2$ s 时刻恢复。电压跌落前发电机功率因数为 1。跌落,发电机采取无功优先模式,无功输出指令为 0.8 p.u.。从图中可以看出,不论是电压故障期间(1.52~2 s)还是电压恢复以后(2.55~3 s),双馈电机机端电压大于电网电

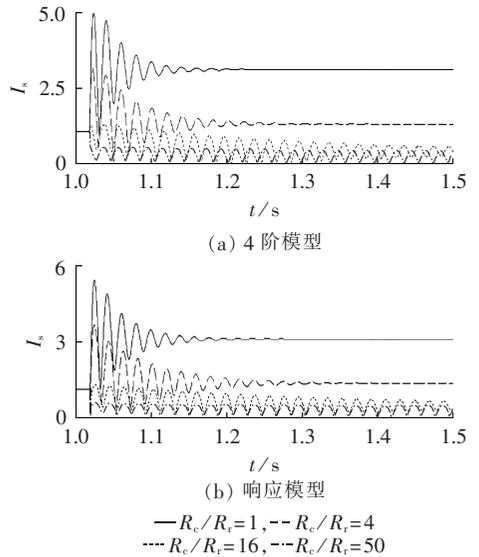


图 6 不同撬棒阻值时的定子故障电流 ($U_{dip}=0.5$ p.u., $s=-0.2$ p.u.)
Fig.6 Stator fault current for different Crowbar resistances ($U_{dip}=0.5$ p.u., $s=-0.2$ p.u.)

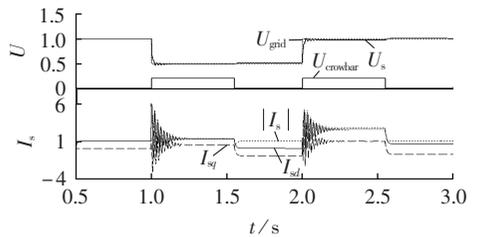


图 7 发电机并网仿真结果(响应模型)
Fig.7 Simulative results of DFIG grid-connection (performance model)

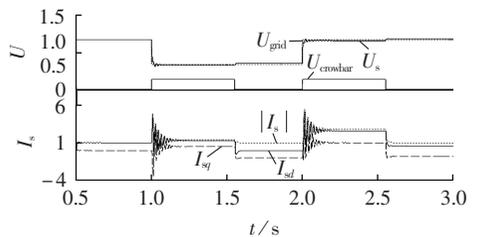


图 8 发电机并网仿真结果(4 阶模型)
Fig.8 Simulative results of DFIG grid-connection (4th-order model)

压,即可以通过控制无功输出而对电网电压起到一定的调节作用。而在撬棒投入期间,发电机因吸收感性无功功率而使机端电压低于电网电压,从而不利于电压恢复。比较图 7、图 8,可以发现响应模型与 4 阶模型的仿真结果十分接近。从仿真效率上而言,使用一台 Thinkpad T400 笔记本电脑(CPU P8700, 2 G RAM),单台 4 阶模型仿真耗时约 6 s,不能满足实时仿真要求,而响应模型几乎瞬间完成。这是由于响应模型直接利用了解析解的结果而不需要计算微分方程组,使得计算速度大为提高,增加机组台数不会明显降低仿真速度,可以应用于风电场的实时仿真。

3 结论

本文研究了电压跌落发生后双馈电机的瞬态响应过程,并考虑了控制方式对故障电流的影响。

一般研究双馈电机的故障电流均从磁链不能突变的原理出发,通过忽略高阶项而得到近似的解析表达式。而本文研究发现,撬棒电阻对故障电流的幅值和衰减时间常数有较大的影响,即随着撬棒电阻的增大,故障电流幅值减小,衰减速度降低。

在对近似解析解进行修正后,本文据此建立了一种双馈风力发电机的动态响应模型,用代数运算取代微分方程迭代求解,计算复杂度大为降低。通过与常用的4阶模型的对比仿真,验证了该响应模型具有较高的预测精度,同时计算速度得到很大提高,适合于大规模的风电并网仿真,如用于研究电力系统稳定性、保护设计、风电场无功补偿控制策略等。

由于该近似解析解是在强电网条件下得出的,因而仍有必要进一步研究该模型在弱电网条件下的适用性。

参考文献:

- [1] TSILI M, PAPATHANASSIOU S. A review of grid code technical requirements for wind farms[J]. *Renewable Power Generation, IET*, 2009, 3(3): 308-332.
- [2] PACS-L:SGCC. State grid corporation of China[EB/OL]. [2013-04-20]. <http://www.wp-forum.cn/webs/NewsFile/20099259296406.pdf>.
- [3] 张保会, 李光辉, 王进, 等. 风电接入电力系统故障电流的影响因素分析及对继电保护的影响[J]. *电力自动化设备*, 2012, 32(2): 1-8.
ZHANG Baohui, LI Guanghui, WANG Jin, et al. Affecting factors of grid-connected wind power on fault current and impact on protection relay[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(2): 1-8.
- [4] 向昌明, 范立新, 蒋一泉, 等. 风电场内风电机组连锁脱网机理与低电压穿越能力研究[J]. *电力自动化设备*, 2013, 33(12): 91-97.
XIANG Changming, FAN Lixin, JIANG Yiquan, et al. Analysis of cascading trip-off mechanism and low voltage ride through capability of wind farm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(12): 91-97.
- [5] 王磊, 贾宏杰. 无功协调控制策略对风电场并网系统小扰动稳定性的影响[J]. *电力自动化设备*, 2012, 32(11): 28-33.
WANG Lei, JIA Hongjie. Impact of coordinated var control on small signal stability of power system with wind farm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(11): 28-33.
- [6] IEC. TC 88 wind turbines[EB/OL]. [2013-04-20]. http://www.iec.ch/dyn/www/?p=103;7:0:::;FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:1282,25.
- [7] SØRENSEN P, ANDRESEN B, FORTMANN J, et al. Overview, status and outline of the new IEC61400-27-Electrical simulation models for wind power generation[C]//10th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Farms. Aarhus, Denmark; [s.n.], 2011: 1-6.
- [8] AKHMATOV V. Analysis of dynamic behavior of electric power systems with large amount of wind power[D]. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark, 2003.
- [9] LUND T, EEK J, USKI S, et al. Fault simulation of wind turbines using commercial simulation tools[C]//Proceedings of Fifth International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms. Glasgow, Scotland, UK; [s.n.], 2005: 1-6.
- [10] FEDERICO M. Power system analysis toolbox documentation for PSAT version 1.3.4[EB/OL]. [2013-04-20]. <http://seit.unsw.adfa.edu.au/staff/sites/hrp/research/PSAT/psat-1.3.4.pdf>.
- [11] FEIJOO A, CIDRAS J, CARRILLO C. A third-order model for the doubly fed induction machine[J]. *Electric Power Systems Research*, 2000, 56(2): 121-127.
- [12] 魏巍, 王渝红, 李兴源, 等. 基于 PSASP 的双馈风电场建模及接入电网仿真[J]. *电力自动化设备*, 2009, 29(12): 68-73.
WEI Wei, WANG Yuhong, LI Xingyuan, et al. Large wind farm modeling and grid-connection simulation based on PSASP[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2009, 29(12): 68-73.
- [13] DEMIRAY T, MILANO F, ANDERSSON G. Dynamic phasor modeling of the doubly-fed induction generator under unbalanced conditions[C]//Power Tech 2007. Lausanne, Switzerland; [s.n.], 2007: 1049-1054.
- [14] KAYIKCI M, MILANOVIC J V. Assessing transient response of DFIG-based wind plants-the influence of model simplifications and parameters[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, 23(2): 545-554.
- [15] EKANAYAKE J B, HOLDSWORTH L, JENKINS N. Comparison of 5th order and 3rd order machine models for Doubly Fed Induction Generator(DFIG) wind turbines[J]. *Electric Power Systems Research*, 2003, 67(3): 207-215.
- [16] 凌禹, 高强, 蔡旭, 等. 紧急变桨与撬棒协调控制改善双馈风电机组低电压穿越能力[J]. *电力自动化设备*, 2013, 33(4): 18-23.
LING Yu, GAO Qiang, CAI Xu, et al. Improvement of low-voltage ride-through by coordinated pitch control and Crowbar control for DFIG wind turbine[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(4): 18-23.
- [17] XIANG Dawei, LI Ran, TAVNER P J, et al. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through[J]. *IEEE Transactions on Energy Converters*, 2006, 21(3): 652-662.
- [18] 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.
- [19] 郑重, 杨耕, 耿华, 等. 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): 7-15.
ZHENG Zhong, YANG Geng, GENG Hua, et al. Short circuit current analysis for DFIG-based wind generation system with Crowbar protection under grid faults[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(11): 7-15.

- [20] 孔祥平,张哲,尹项根,等. 计及撬棒保护影响的双馈风力发电机短路电流特性研究[R/OL]. [2012-03-21]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/201203-595>.

作者简介:

龚文明(1986-),男,湖北恩施人,博士研究生,研究方向为风力发电与柔性直流输电技术(E-mail:gwm@mail.iee.ac.cn);



龚文明

胡书举(1978-),男,河南南阳人,副研究员,博士,通讯作者,研究方向为风力发电、光伏发电系统电气控制及检测技术(E-mail:hushuju@mail.iee.ac.cn);

许洪华(1967-),男,山东聊城人,研究员,博士研究生导师,研究方向为风力发电、光伏发电及其混合发电系统技术。

Response model of DFIG for real-time simulation of large-scale wind farms

GONG Wenming^{1,2,3}, HU Shuju^{2,3}, XU Honghua^{2,3}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Key Laboratory of Wind Energy Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: A response model of DFIG (Doubly Fed Induction Generator) is proposed based on its dynamic response, which, instead of differential equations, applies algebra methods to improve its computational efficiency for the real-time simulation of wind farm and the in-loop test of its hardware controller. Two kinds of DFIG operation are classified according to grid voltage: normal operation and faulty operation. As the output currents of DFIG well follow the references during normal operation, it can be equated to an inertia component with small time constant. As large impulsive currents may appear in both its stator and rotor during grid voltage dip, the impacts of pre-fault condition, generator parameters and Crowbar resistance on fault current are studied and the analytical expressions of fault currents are derived based on the flux invariance principle. The comparison with the conventional 4th-order model verifies the correctness of the proposed model.

Key words: wind power; doubly fed induction generator; low voltage ride through; response model; Crowbar resistor; wind farms

(上接第100页 continued from page 100)

System Protection and Control, 2010, 38(15):24-37.

- [20] 赵强,刘肇旭,张丽. 对中国低频减载方案制定中若干问题的探讨[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(11):48-53.

ZHAO Qiang, LIU Zhaoxu, ZHANG Li. Discussions on the several problems of under-frequency load shedding scheme in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11):48-53.

- [21] 熊小伏,李东晋. 基于在线负荷检测的变电站低频减载方案[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9):32-35.

XIONG Xiaofu, LI Dongjin. Under-frequency load shedding based on online load detection for electric substations [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9):32-35.

作者简介:



宋兆欧

宋兆欧(1988-),男,四川成都人,硕士研究生,从事电力系统稳定与控制方面的研究工作(E-mail:cklein927@163.com);

刘俊勇(1963-),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,主要从事电力市场、电力系统稳定与控制、电力系统可视化等方面的研究工作;

刘友波(1983-),男,四川成都人,讲师,博士,从事电力系统脆弱性评估与连锁故障

方面的研究工作。

WAMS-based adaptive UFLS considering dynamic correction

SONG Zhaoou^{1,2}, LIU Junyong^{1,2}, LIU Youbo^{1,2}, MASOUD Bazargan³, LIANG Wuxing³

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Sichuan Smart Grid Key Laboratory, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. ALSTOM Grid Research & Technology Centre, Stafford ST17 4LX, UK)

Abstract: Traditional UFLS (Under-Frequency Load Shedding) applies the method of successive approximation, which may cause over or under shedding due to its lack of adaptability to operational conditions of system. An adaptive UFLS based on WAMS (Wide Area Measurement System) is proposed with the consideration of dynamic correction. Based on low-order frequency response model, the effect of voltage on the imbalanced active-power is considered and the active-power deficit is estimated with the system response trajectory of short cycle. The self-recovery ability of system frequency is considered and the frequency variation rate is used to dynamically correct the load shedding amount. The load shedding amount of each load node is comprehensively determined by multiple indexes, including load characteristics and generator inertia. Simulative results of IEEE 68-bus system indicate that, the proposed method effectively reduces the load shedding amount and the frequency recovery time, guaranteeing the stable system operation.

Key words: WAMS; UFLS; active-power deficit; static load characteristics; generator inertia