

基于可变阻尼器的双馈风电机组故障穿越控制策略

张军利¹, 张元敏^{1*}, 李玉忍²

(1. 许昌学院 电气工程学院, 河南 许昌 461000; 2. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 714001)

摘要:为了解决双馈风电机组(doubly-fed induction generator wind power generation system, DFIG-WPGS)在连接点电网电压发生跌落故障时的转子过电流、改善DFIG-WPGS的故障穿越(fault-ride-through, FRT)性能等问题,提出了应用于DFIG-WPGS的可变阻尼器(based on variable damper, BVD)的控制方法。该控制方法采用基于虚拟撬棒电阻电感的负反馈控制,在DFIG转子侧引入的虚拟撬棒电阻与故障时电网电压跌落程度相关,且虚拟撬棒电阻的取值控制在合理的取值范围之内;BVD控制方法通过在DFIG转子电流控制环引入阻尼器,限制故障状态下DFIG的转子过电流,且对故障过程中的转子电流进行有效控制。连接点电网电压发生深度跌落故障时DFIG-WPGS的FRT仿真结果显示:在连接点电网电压深度跌落故障发生时刻,BVD控制方法的交流励磁电源直流侧电压的泵升幅度比矢量控制方法的更小,BVD控制方法的DFIG转子过电流幅值更小,而且故障期间转子电流的幅值比矢量控制方法的更大,更利于DFIG的功率控制;实验结果进一步验证了BVD控制方法的有效性。在改善DFIG-WPGS的FRT性能过程中,基于可变阻尼器的控制方法不仅可以有效抑制交流励磁电源的直流侧过电压、抑制DFIG转子过电流,而且可以有效控制故障过程中DFIG的输出功率,该方法在风电场具有一定的工程实践使用价值。

关键词:双馈风电机组;发电;风力;电场;故障穿越;可变阻尼器

中图分类号:TM614

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)05-0209-07

Control Strategy of Fault-ride-through-based on Variable Damper in Doubly-fed Induction Generator Wind Power Generation System

ZHANG Junli¹, ZHANG Yuanmin^{1*}, LI Yuren²

(1. College of Electrical Eng., Xuchang Univ., Xuchang 461000, China;

2. College of Automation, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 714001, China)

Abstract: In order to solve the problems of rotor over-current and fault-ride-through (FRT) and improve the performance of the doubly-fed induction generator wind power generation system (DFIG-WPGS), the based on variable damper (BVD) strategy was proposed. The negative feedback control based on virtual crowbar resistance and inductance was used in the BVD control method. The virtual variable resistance and inductance circuit was introduced in the DFIG rotor side. The virtual variable resistance was positively related to faulty PCC voltage amplitude. In the BVD control method, a damper was introduced in DFIG rotor current control loop to limit the overcurrent. The BVD control method could effectively control the rotor current in the fault process of DFIG-WPGS. The FRT simulation results of DFIG-WPGS as deep drop fault appeared in PCC voltage were showed as follows. In the BVD control method, the DC boost voltage of the AC excitation power supply was smaller than that of the vector control method. At the moment of PCC voltage drop fault, the overcurrent amplitude of the DFIG rotor was smaller. The amplitude of the rotor current during the fault process was greater, which was more conducive to DFIG power control. The effectiveness of the BVD control method was further validated by the experimental results. While improving the FRT performance of DFIG-WPGS, the BVD control method could not only effectively suppress DC side overvoltage of the AC excitation power supply, but also suppress the DFIG rotor overcurrent. The proposed BVD control method is practical in engineering applications.

收稿日期:2017-08-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11681240380);河南省科技攻关计划(工业领域)资助项目(182102210507);河南省教育厅自然基金资助项目(18B470010)

作者简介:张军利(1978—),男,博士,副教授。研究方向:风力发电及其控制技术。E-mail: zjl259@163.com

* 通信联系人 E-mail: zym@xcu.edu.cn

网络出版时间:2018-08-30 00:26:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180830.0026.009.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

Key words: doubly-fed induction generator wind power generation system; power generation; wind power; electric power plants; fault-ride-through; based on variable damper

连接点电网电压发生跌落故障时,双馈风力发电机组(DFIG-WPGS)需要改善其控制性能,满足国标《风电场接入电力系统技术规定》(GB/T19963—2011)中故障穿越(FRT)的要求^[1]。

DFIG-WPGS的FRT能力受到交流励磁电源容量的限制,其对电网电压的故障比较敏感,需要采取保护措施,抑制DFIG转子侧过电流,保护交流励磁电源。Hu等^[2]提出了变流器的比例谐振控制技术,该技术实现了DFIG-WPGS的FRT,但是该方法对连接点电网电压对称跌落故障的控制效果不理想,且谐振点的选择存在一定的误差。胡家兵^[3]和Yang^[4]等提出了双dq-PI转子电流控制技术,该技术通过坐标变换将旋转分量变换为直流量,采用传统PI控制方法,但是,该方法计算量较大,给控制器带来一定的负担,且该方法性能指标需进一步改善。Lima^[5]、Rahimi^[6]、谭伦农^[7]等提出了基于电压的功率补偿方法,该方法采用有功功率补偿的方法对电压的平方进行控制,控制器设计难度较低,但是,该方法控制效果不理想,对交流励磁电源的保护作用有限,没有考虑抑制转子过电流的动态过程,没有最大程度地发挥故障期间DFIG-WPGS的无功功率支撑能力。邓文浪^[8]、高仕红^[9-10]等提出了一种主动阻尼器的控制方法以抑制交流励磁电源和DFIG转子过电流,提高电网电压跌落故障期间DFIG-WPGS的运行能力,但是,该方法不能动态调整主动阻尼器的阻尼系数,控制器的动态性能没有得到有效利用,控制效果有待改善。凌禹^[11]、孟娜娜^[12]等提出了转子撬棒Crowbar保护和定子撬棒Crowbar保护技术,以实现DFIG-WPGS的FRT,但是,其带来的问题是,撬棒Crowbar投入工作过程中,DFIG中交流励磁电源会退出工作,交流励磁电源失去对发电机的控制作用,不能有效控制DFIG输出的有功功率和无功功率,不利于系统稳定。Pannell等^[13]采用直流侧卸荷电路抑制交流励磁电源的直流侧过电压,Elshiekh等^[14]采用超级电容器稳定直流侧电压以提高交流励磁电源的性能,但是,这两种方法都不能抑制机侧变流器的动态过电压和过电流,FRT效果有待改善。Abdel-Baqi^[15]、Ramirez^[16]、Kumar^[17]等采用DFIG定子侧加装辅助装置以提高DFIG-WPGS的FRT能力,但是,该方法增加了硬件成本,还必须考虑协调控制问题。

在上述研究的基础上,作者提出应用于DFIG-WPGS的可变阻尼器(BVD)的控制方法,以抑制DFIG转子过电流,同时,尽可能地提高故障期间交

流励磁电源输出电流的幅值,改善DFIG-WPGS的FRT性能。所提出的BVD控制方法通过在DFIG转子侧引入虚拟电阻电感电路,以改善转子电流的阻尼系数,且该虚拟电阻-电感跟随连接点电网电压的跌落程度进行动态调整,有效保护交流励磁电源;同时,使得故障期间DFIG转子电流尽可能的增大,有效地控制了DFIG输出有功功率和无功功率,改善了DFIG-WPGS的FRT性能。

1 双馈发电机的动态过程

采用矩阵形式表示DFIG定子、转子磁链方程和定子、转子电压方程^[2-6],分别如式(1)、(2)所示:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{1ABC} \\ \Psi_{2abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1ABC} \\ i_{2abc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_{1ABC} \\ u_{2abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{1ABC} & 0 \\ 0 & R_{2abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1ABC} \\ i_{2abc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{1ABC} \\ \Psi_{2abc} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(1)、(2)中, Ψ_{1ABC} 、 Ψ_{2abc} 、 i_{1ABC} 、 i_{2abc} 、 u_{1ABC} 、 u_{2abc} 、 R_{1ABC} 、 R_{2abc} 分别为DFIG定子和转子三相磁链、三相电流、三相电压及三相电阻列矩阵, L_{11} 、 L_{22} 、 L_{12} 、 L_{21} 分别为DFIG定子和转子三相电感矩阵、定子与转子绕组间、转子与定子绕组间互感矩阵。

线圈中的磁链遵循守恒原则为相邻时刻的磁链是连续的。当电网电压发生三相对称跌落故障时,干扰量会迫使线圈中的磁链发生改变,线圈自身会感生出一个自由电流,其在线圈中又对应产生一个磁场,感生电流产生的磁场会反作用于扰动在线圈中产生的磁链,因此,应尽量维持扰动之前线圈中磁链不变。对于DFIG,当连接点电网电压发生跌落故障时,在动态过程中相当于有扰动出现在DFIG定子端,该扰动会促使定子磁链发生变化,发生变化的定子磁链可分解为两部分:一是,定子磁链旋转分量,它以同步速度旋转,其幅值与定子电压的幅值成正比,等同于故障前全部的定子磁链;二是,定子磁链直流分量,它主要是由扰动引起的,在空间中不旋转而保持静止,其幅值是衰减的^[9-10]。

当故障引起电网电压跌落的比例为 λ 时,由于电网电压跌落,稳态的定子电压和定子磁链都会减小为原值的 λ 倍,跌落后的稳态定子电压和定子磁链可以表示为:

$$\begin{cases} u_{1ABC,\lambda} = \lambda u_{1ABC}, \\ \Psi_{1ABC,\lambda} = \frac{\lambda u_{1ABC}}{j\omega_1} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{u}_{1ABC_l}$ 、 Ψ_{1ABC_l} 分别为电网电压跌落故障时DFIG定子电压列矩阵和磁链列矩阵。

连接点电网电压发生跌落故障时,DFIG定子磁链可以表示为:

$$\Psi_{1ABC_l} = \frac{\lambda \mathbf{u}_{1ABC}}{j\omega_1} + \frac{(1-\lambda)\mathbf{u}_{1ABC}}{\omega_1} e^{j(2\pi x - \frac{\pi}{2})} e^{-\frac{R_{1ABC}}{L_{1m}} t} \quad (4)$$

当连接点电网电压发生跌落故障时,DFIG定子磁链可以分解为旋转分量和直流分量两部分,它们分别对DFIG转子电压产生作用,因此,DFIG转子电压可以表示为:

$$\mathbf{u}_{2abc_l} = \mathbf{u}_{2abc_ls} + \mathbf{u}_{2abc_ldc} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{u}_{2abc_ls}$ 和 $\mathbf{u}_{2abc_ldc}$ 分别为DFIG定子旋转磁链和直流磁链所产生的转子电压。 $\mathbf{u}_{2abc_ls}$ 和 $\mathbf{u}_{2abc_ldc}$ 的表达式如式(6)、(7)所示:

$$\mathbf{u}_{2abc_ls} = \lambda \mathbf{u}_{1ABC} s \frac{L_{12}}{L_{11}} \quad (6)$$

$$\mathbf{u}_{2abc_ldc} = -\frac{L_{12}}{L_{11}} \left(\frac{R_{1abc}}{L_{11}} + j\omega_r \right) \times \frac{(1-\lambda)\mathbf{u}_{1ABC}}{\omega_1} e^{j(2\pi x - \frac{\pi}{2})} e^{-\frac{R_{1ABC}}{L_{11}} t} \quad (7)$$

忽略DFIG定子电阻和定子电感对转子电压的影响,则由式(7)可得转子电压中与定子磁链直流分量相关的部分可以简化为:

$$\mathbf{u}_{2abc_ldc} = \frac{L_{12}}{L_{11}} (1-s)(1-\lambda) \times \mathbf{u}_{1ABC} e^{j\theta_0} e^{-\frac{R_{1ABC}}{L_{11}} t} \quad (8)$$

式中, θ_0 为 t_0 时刻电网电压的相位角。

简化后的DFIG转子电压可以表示为:

$$\mathbf{u}_{2abc_l} = \mathbf{u}_{2abc_ls} + \mathbf{u}_{2abc_ldc} = \frac{L_{12}}{L_{11}} [\lambda \mathbf{u}_{1ABC} s + (1-s)(1-\lambda) \times \mathbf{u}_{1ABC} e^{j\theta_0} e^{-\frac{R_{1ABC}}{L_{11}} t}] \quad (9)$$

由式(9)可以看出,DFIG转子电压可以表示为两部分:一是,定子磁链旋转部分所对应的分量,与电压跌落深度和转差率有关,该部分在转子电压中所占份额较小;二是,定子磁链直流部分所对应的分量,其与转差率和电压跌落幅度正相关,当电网电压跌落幅度越大、DFIG转速越高时,该部分产生的电动势也越大,该部分在转子电压中所占的份额较大。当电网电压跌落故障程度严重且DFIG旋转速度较快时,转子电压的第2部分电压升高很快,有可能超过转子所能承受的最大电压值,此时交流励磁电源由于容量所限不能提供足够的能量以维持式(9)的平

衡,从而引起双馈电机转子电流失控、交流励磁电源的直流电容器电压波动、整个交流励磁电源不能有效控制风力发电机组^[11,18-20]。

2 基于可变阻尼器的故障穿越技术

当连接点电网电压发生对称跌落故障时,DFIG定子磁链中会产生直流分量;当电网电压发生不对称跌落故障时,定子电压的扰动会形成定子磁链的负序分量和直流分量,直流分量和负序分量都可看作是扰动分量。DFIG定子磁链中的扰动分量都会造成转子过电压,从而出现转子侧过电流,同时,会危及交流励磁电源直流侧电容器,使电容器电压过高。

给出一种基于可变阻尼器的DFIG-WPGS的FRT技术。由DFIG转子电压方程可以得到转子电压,表示为:

$$\mathbf{u}_{2abc} = \frac{L_{12}}{L_{11}} \left(\frac{d}{dt} \Psi_{1ABC} - j\omega_1 \Psi_{1ABC} \right) + \left[\mathbf{R}_{2abc} \mathbf{i}_{2abc} + \sigma L_{22} \left(\frac{d}{dt} \mathbf{i}_{2abc} - j\omega_r \mathbf{i}_{2abc} \right) \right] \quad (10)$$

式中:第1项为DFIG转子开路电压,即 $\mathbf{u}_{2abc_o} = \frac{L_{12}}{L_{11}} \left(\frac{d}{dt} \Psi_{1ABC} - j\omega_1 \Psi_{1ABC} \right)$;第2项为DFIG转子绕组等效阻抗所对应的 $\mathbf{u}_{2abc_e} = \left[\mathbf{R}_{2abc} \mathbf{i}_{2abc} + \sigma L_{22} \left(\frac{d}{dt} \mathbf{i}_{2abc} - j\omega_r \mathbf{i}_{2abc} \right) \right]$,其中, σ 为DFIG漏磁系数。对于DFIG转子电压,转子开路电压 $\mathbf{u}_{2abc_o}$ 可以看作是扰动项,它会影响电流内环的动态性能,应消除或减弱该扰动项对转子电压的影响,这需要增大式(10)中转子电流前面的系数 $\mathbf{R}_{2abc}$;DFIG转子绕组对应的电压部分 $\mathbf{u}_{2abc_e}$ 基本固定不变。因此,拟在电流内环中引入一个局部负反馈,以增加扰动项 $\mathbf{u}_{2abc_o}$ 变化对转子电流内环动态性能的阻尼。

图1为DFIG引入可变阻尼器的单相转子电流控制框图。

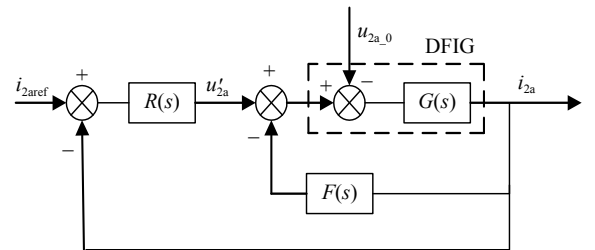


图1 基于可变阻尼器的DFIG单相转子电流控制框图
Fig.1 BVD control block diagram of DFIG single phase rotor current

图1中: i_{2aref} 、 u_{2a_o} 分别为DFIG的a相转子电流参考值和转子开路电压; u'_{2a} 为基于可变阻尼器后DFIG的a相转子电压; $R(s)$ 为基于可变阻尼器控制中的电流调节

器的传递函数,是采用传统的PI调节器; $G(s)$ 为DFIG内部的转子电压电流关系, $G(s)=\frac{1}{R_2+\sigma L_{22}s}$; $F(s)$ 为基于可变阻尼器控制中的负反馈函数,将 $F(s)$ 设计为一个比例微分函数 $F(s)=R_f+L_f s$ 。

引入比例微分负反馈之后,对于DFIG转子侧,转子电压中与转子电流密切相关部分的传递函数发生了变化,即图1中内层的闭环传递函数变为:

$$G'(s)=\frac{G(s)}{1+F(s)G(s)}=\frac{1}{(R_{2a}+R_f)+(\sigma L_{22}s+L_f s)}\tag{11}$$

引入该比例微分负反馈,相当于在转子侧引入一个附加电阻电感电路,用于抑制转子过电流,但是,该电阻电感电路在实际的DFIG转子侧是不存在的,也就避免了实际存在电阻的一些弊端,该电阻电感电路被称其为可变阻尼器。基于可变阻尼器的DFIG单相转子等效电路如图2所示。

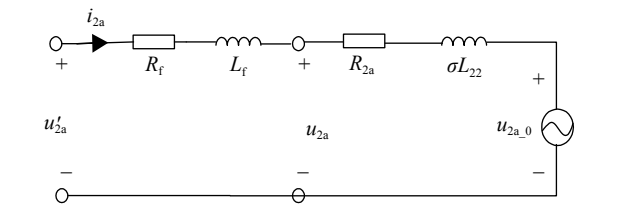


图 2 基于可变阻尼器的转子等效模型
Fig. 2 BVD equivalent model of DFIG rotor

若可变阻尼器的比例微分函数 $F(s)$ 的比例系数取值越小,越有利于交流励磁电源内部参数的调整,但太小的比例系数对于抑制电网电压故障情况下转子过电流的能力太差,达不到撬棒保护电路的基本要求;若可变阻尼器的比例微分函数 $F(s)$ 的比例系数取值越大,越有利于DFIG-WPGS抑制故障状态下的转子过电流,可实现电网电压较深跌落幅度下的FRT,但其取值也不能无限制的增大,其最大值为 R_{f_max} ,即限幅值为 R_{f_max} 。为了提高引入可变阻尼器的DFIG-WPGS的FRT能力,负反馈函数 $F(s)$ 中 R_f 的取值应根据电网电压跌落故障的严重程度进行实时优化。

负反馈函数中, R_f 应与电网电压跌落的严重程度相关。当电网电压发生轻度跌落故障时, R_f 与 λ 是反向比例关系。当电网电压发生深度跌落故障时, R_f 应该增大,但是,太大的比例函数取值,一方面,会增加交流励磁电源的负担,使其不能全额有效地提供DFIG工作过程中所需的无功功率;另一方面,有可能引起转子侧过电压。因此,需要对 R_f 进行限幅,不能随着 λ 的减小而持续增加,此时,DFIG-WPGS需要考虑投入撬棒Crowbar保护电路以提高其FRT能力。为了使引入的可变阻尼器既能满足抑制电流的要求,又不会增加交流励磁电源的负担,作者采用式

(12)确定其取值:

$$\sqrt{\left(\frac{u'_{2a}}{2I_{2a}}\right)^2-(\omega_r\lambda L_{22})^2}-R_{2a}\leq R_f\leq\frac{\omega_r\lambda L_{22}v_{dc}}{\sqrt{v_{dc}^2-u_{2a}^2}}-R_{2a}\tag{12}$$

将基于可变阻尼器的控制方法与传统撬棒Crowbar电路的控制方法相比较^[11-12],可以看出,传统方法在转子侧引入撬棒Crowbar保护电路之后,转子侧的励磁电源会退出,DFIG转子侧没有了励磁电源,则DFIG就变成了感应异步发电机。尽管撬棒Crowbar保护电路可以抑制转子的过电流幅度,当DFIG-WPGS的交流励磁电源退出工作,DFIG可以输出有功功率,但此时其相当于异步发电机,需要电网为其提供无功功率,相当于异步发电机工作方式的DFIG还需要并联其他的无功发生器为电网电压恢复提供无功支撑。基于可变阻尼器的负反馈控制方法在DFIG转子侧引入可变电阻,抑制转子过电流。与传统的撬棒Crowbar保护电路相比,基于可变阻尼器的控制方法保持了励磁电源的持续工作,励磁电源持续工作的DFIG可以有效地控制其输出的有功功率,也可以控制其输出的无功功率,励磁电源还可以控制转差功率。

3 仿真结果与分析

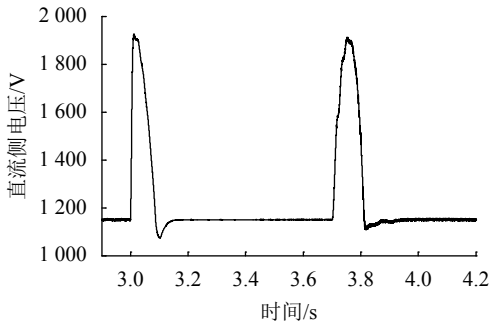
为了研究提出的引入可变阻尼器控制方法配合撬棒Crowbar保护电路抑制DFIG转子过电流的有效性,当连接点电网电压发生深度跌落故障(电压幅值跌落至额定值的20%)时,DFIG-WPGS可以采用矢量控制方法配合撬棒Crowbar保护电路实现FRT,也可以采用作者提出的基于可变阻尼器的控制方法配合Crowbar保护电路实现FRT。

DFIG-WPGS的仿真模型参数如表1所示。DFIG-WPGS的FRT的仿真过程中,故障发生在3.0~3.7 s。

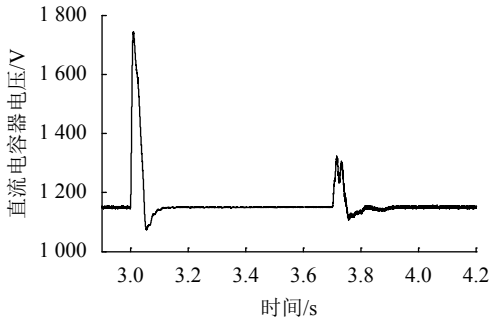
表 1 双馈发电机主要参数
Tab. 1 Main parameters of DFIG

参数	取值
DFIG额定功率/MW	1.5
DFIG定子额定电压/V	220
DFIG定子额定频率/Hz	50
DFIG定子电阻/p.u.	0.007 06
DFIG定子漏感/p.u.	0.171
DFIG转子电阻/p.u.	0.005
DFIG转子漏感/p.u.	0.156
DFIG极对数	3

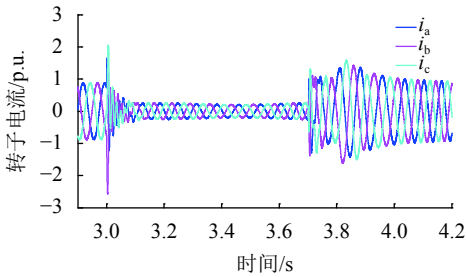
图3为作者提出的引入可变阻尼器配合撬棒Crowbar保护电路的控制方法和采用矢量控制配合撬棒Crowbar保护电路控制方法的仿真结果。



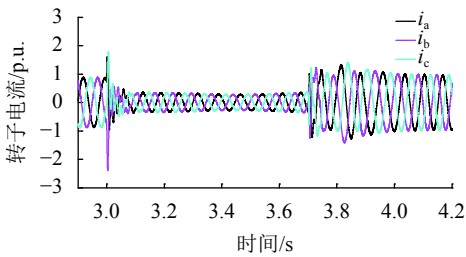
(a) 矢量控制+Crowbar 方法的直流侧电压



(b) 可变阻尼器+Crowbar 方法的直流侧电压



(c) 矢量控制+Crowbar 方法的转子电流



(d) 可变阻尼器+Crowbar 方法的转子电流

图3 深度电网电压跌落故障时两种控制方法的仿真结果
Fig. 3 Simulation results of two control methods in deep PCC voltage drop fault

通过对比可以看出,在深度电网电压跌落故障发生时刻和恢复时刻,DFIG-WPGS采用矢量配合撬棒Crowbar保护电路控制方法所产生的直流侧电压泵升幅达到了1 920 V和1 900 V;而基于可变阻尼器配合撬棒Crowbar保护电路控制方法的交流励磁电源的直流侧电压泵升幅为1 760 V和1 340 V;在深度电网电压跌落故障发生时刻,DFIG-WPGS采用矢量配合撬棒Crowbar保护电路控制方法的DFIG转子电

流最大两相幅值为2.76 p.u.和2.18 p.u.,而基于可变阻尼器配合撬棒Crowbar保护电路控制方法的DFIG转子电流最大两相幅值为2.55 p.u.和1.86 p.u.,故障期间基于可变阻尼器配合撬棒Crowbar保护电路控制方法的转子电流的幅值比矢量配合撬棒Crowbar保护电路控制方法情况下的幅值大,更利于控制DFIG输出有功功率和无功功率。DFIG-WPGS中采用可变阻尼器配合撬棒Crowbar保护电路的控制方法提高了DFIG-WPGS的FRT能力。

4 实验结果与分析

DFIG定子侧通过电力滤波器并网,转子侧交流励磁电源通过变压器连接电网。网侧变流器和机侧变流器之间通过直流电容器连接,直流电容器中采用并联卸荷Chopper保护电路。当电网电压发生深度跌落故障(电压幅值跌落为额定值的20%)时,变速恒频DFIG-WPGS采用矢量控制配合撬棒Crowbar保护电路和卸荷Chopper控制方法的FRT实验波形如图4所示。

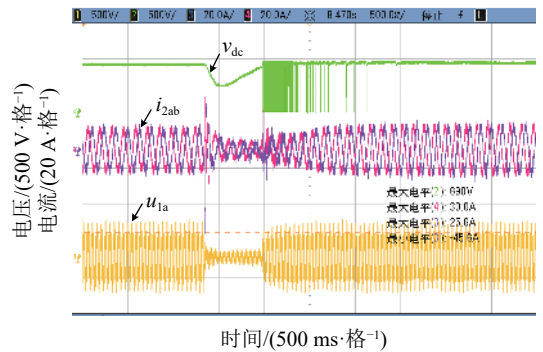


图4 矢量控制+Crowbar+Chopper方法下深度跌落(额定值的20%)的FRT

Fig. 4 Results of vector control+Crowbar+Chopper control method as the 20% of rated voltage

图4中,电网电压发生深度跌落故障的持续时间为650 ms。从图4可以看出,DFIG转子电流在故障初期出现了较大幅度的过电流,最大电流达到故障前工作电流的400%,如此大的过电流会对DFIG-WPGS交流励磁电源造成较大的影响。

图5为电网电压发生深度跌落故障时,变速恒频DFIG-WPGS采用可变阻尼器+撬棒Crowbar+卸荷Chopper方法的FRT实验波形。DFIG交流励磁电源在故障初期的过电流幅度较小,电流最大值为故障前工作电流的180%左右,比图4中的过电流幅度有所减小,保护了交流励磁电源,该方法有效地提高了变速恒频DFIG-WPGS的FRT能力。

当连接点电网电压发生跌落故障时,实验对比了矢量控制配合撬棒Crowbar+卸荷Chopper保护电路

和基于可变阻尼器配合撬棒Crowbar+卸荷Chopper保护电路方法的效果,由图4、5可以看出,基于可变阻尼器配合撬棒Crowbar+卸荷Chopper保护电路的FRT方法可以在降低DFIG转子过电流的同时,有效地抑制交流励磁电源直流侧过电压,改善了变速恒频DFIG-WPGS的FRT性能。

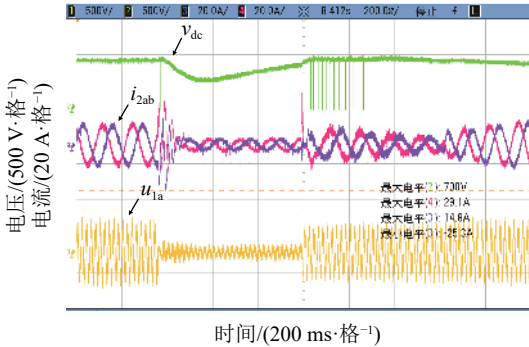


图 5 可变阻尼器+Crowbar+Chopper方法下深度跌落(额定值的20%)的FRT

Fig. 5 Results of BVD + Crowbar + Chopper control method as the 20% of rated voltage

5 结 论

为了改善DFIG-WPGS的FRT性能以满足电网公司对高渗透率的风力发电机组的要求,在连接点电网电压发生跌落故障时,采用作者改进的BVD控制方法,有效抑制DFIG转子过电流。

改进的BVD控制方法采用基于虚拟撬棒电阻电感的负反馈控制,在DFIG转子侧引入虚拟附加电阻电感电路,虚拟可变电阻与故障跌落时电网电压成反向比例关系,且其取值有一定的范围,根据变速恒频DFIG-WPGS实现FRT的要求和交流励磁电源自身的容量而定。

DFIG-WPGS中采用改进的BVD控制方法的FRT技术,可以实现DFIG故障过程中励磁电流的有效控制,从而有效地控制DFIG输出有功功率和无功功率。

下一步研究工作是:将改进的BVD控制方法应用于连接点电网电压不平衡情况下DFIG-WPGS实现FRT,进一步体现BVD控制方法的工程实践使用价值。

参考文献:

[1] 中国国家标准化管理委员会.风电场接入电力系统技术规定:GB/T 19963—2011[S].北京:中国标准出版社,2012.

[2] Hu Jiabing,He Yikang,Xu Lie,et al.Improved control of DFIG systems during network unbalance using PI-R current regulators[J].*IEEE Transactions on Industrial Electronics*,2009,56(2):439–451.

[3] Hu Jiabing,He Yikang,Wang Hongsheng,et al.Coordinated control of grid- and rotor- side converters of doubly-fed in-

duction generator under unbalanced network voltage conditions[J].*Proceedings of the CSEE*,2010,30(9):97–104.[胡家兵,贺益康,王宏胜,等.不平衡电网电压下双馈感应发电机网侧和转子侧变换器的协同控制[J].*中国电机工程学报*,2010,30(9):97–104.]

[4] Yang Lihui,Xu Zhao,Ostergaard J,et al.Advanced control strategy of DFIG wind turbines for power system fault ride through[J].*IEEE Transactions on Power Systems*,2012,27(2):713–722.

[5] Lima F K A,Luna A,Rodriguez P,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.

[6] Rahimi M,Parniani M.Coordinated control approaches for low-voltage ride-through enhancement in wind turbines with doubly fed induction generators[J].*IEEE Transactions on Energy Conversion*,2010,25(3):873–883.

[7] Tan Lunnong,Wang Xiao,Chen Wuhui.Optimization for capability of asymmetrical fault ride through of DFIG[J].*Power System Technology*,2014,38(12):3502–3508.[谭伦农,王肖,陈武晖.双馈风电机组不对称故障穿越性能优化[J].*电网技术*,2014,38(12):3502–3508.]

[8] Deng Wenlang,Chen Zhiyong,Duan Bin.Control strategy improved fault ride-through for doubly-fed wind-power generation system[J].*Electric Machines and Control*,2010,14(12):15–22.[邓文浪,陈智勇,段斌.提高双馈式风电系统故障穿越能力的控制策略[J].*电机与控制学报*,2010,14(12):15–22.]

[9] Gao Shihong.Control strategy of fault ride-through performance improvement for double-fed wind turbine generation system[J].*Renewable Energy Resources*,2016,34(6):828–836.[高仕红.双馈风力发电系统故障穿越性能改善的控制策略[J].*可再生能源*,2016,34(6):828–836.]

[10] Gao Shihong,Tian De,Deng Ying,et al.Fault ride-through control strategy for doubly-fed induction generator based on active damper[J].*Acta Energaie Solaris Sinica*,2014,35(4):576–582.[高仕红,田德,邓英,等.基于主动阻尼器的双馈式风力发电机组故障穿越控制策略[J].*太阳能学报*,2014,35(4):576–582.]

[11] Ling Yu,Cai Xu.Fault ride-through of DFIG wind turbine with rotor series resistor[J].*Electric Power Automation Equipment*,2014,34(8):25–30.[凌禹,蔡旭.基于转子串电阻的双馈风电机组故障穿越技术[J].*电力自动化设备*,2014,34(8):25–30.]

[12] Meng Nana,Sun Liling.Analysis of fault ride-through of doubly-fed wind power generator based on rotor series resistor[J].*Modern Electric Power*,2017,34(3):19–24.[孟娜娜,孙丽玲.基于转子串电阻的双馈风电机组的故障穿越方法研究[J].*现代电力*,2017,34(3):19–24.]

[13] Pannell G,Zahawi B,Atkinson D J,et al.Evaluation of the performance of a DC-link brake chopper as a DFIG low-voltage fault-ride-through device[J].*IEEE Transactions on Energy Conversion*,2013,28(3):535–542.

- [14] Elshiekh M E, Mansour D-E A. Improving fault ride-through capability of DFIG-based wind turbine using superconducting fault current limiter[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2013(3): 560–574.
- [15] Abdel-Baqi O, Nasiri A. Series voltage compensation for DFIG wind turbine low-voltage ride-through solution[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, 26(1): 272–285.
- [16] Ramirez D, Martinez S, Platero C A, et al. Low-voltage ride-through capability for wind generators based on dynamic voltage restorers[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, 26(1): 195–203.
- [17] Kumar N S, Gokulakrishnan J. Impact of FACTS controllers on the stability of power systems connected with doubly fed induction generator[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2011, 33(5): 1172–1184.
- [18] Kayikci M, Milanovic J V. Dynamic contribution of DFIG-based wind plants to system frequency disturbances[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2009, 24(2): 859–867.
- [19] Guo Jiahu, Zhang Luhua, Cai Xu. Dynamic response of wind power generation based on DFIG under grid fault[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2010, 31(8): 1023–1029. [郭家虎, 张鲁华, 蔡旭. 双馈风力发电系统在电网故障下的动态响应分析[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(8): 1023–1029.]
- [20] Su Ping, Fu Jihua, Zhao Xinzh, et al. Research on asymmetrical faults ride-through control of doubly fed induction generator (DFIG)[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(16): 101–106. [苏平, 付纪华, 赵新志, 等. 电网不对称故障下双馈风力发电机组穿越控制的研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(16): 101–106.]

(编辑 赵 婧)

引用格式: Zhang Junli, Zhang Yuanmin, Li Yuren. Control strategy of fault-ride-through-based on variable damper in doubly-fed induction generator wind power generation system[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(5): 209–215. [张军利, 张元敏, 李玉忍. 基于可变阻尼器的双馈风电机组故障穿越控制策略[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(5): 209–215.]

(上接第188页)

- [14] Han Yunfeng, Zheng Cui'e, Sun Dajun. Localization of large scale underwater sensor networks based on recursive position estimation[C]//Proceedings of the 2015-MTS/IEEE Washington OCEANS. *Washington: IEEE*, 2015: 1–4.
- [15] Caffery J J. A new approach to the geometry of TOA location[C]//Proceedings of the IEEE 52nd Vehicular Technology Conference Fall. *Boston: IEEE*, 2000: 1943–1949.
- [16] Chandrasekhar V, Seah W. An area localization scheme for underwater sensor networks[C]//Proceedings of the 2006-Asia Pacific OCEANS. *Singapore: IEEE*, 2006: 1–8.
- [17] Liu Linfeng, Wu Jiagao, Zhu Zhiwen. Multihops fitting approach for node localization in underwater wireless sensor networks[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015, 11(7). DOI: 10.1155/2015/682182.
- [18] Guo Zhongwen, Guo Ying, Hong Feng, et al. Perpendicular intersection: Locating wireless sensors with mobile beacon[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(7): 3501–3509.
- [19] Guo Zhongwen, Guo Ying, Hong Feng, et al. Perpendicular Intersection: Locating wireless sensors with mobile beacon[C]//Proceedings of the 2008 IEEE Real-time Systems Symposium. *Barcelona: IEEE*, 2008: 93–102.
- [20] Zhou Yi, He Jianhua, Chen Kai, et al. An area localization scheme for large scale underwater wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 2009 WRI International Conference on Communications and Mobile Computing. *Piscataway: IEEE*, 2009: 543–549.
- [21] Yang Zheng, Li Mo, Liu Yunhao. Sea depth measurement with restricted floating sensors[C]//Proceedings of the 28th IEEE Real-time Systems Symposium (RTSS 2007). *Tucson: IEEE*, 2007: 469–478.
- [22] Guo Ying. Localization for active-restricted 3D underwater sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2013, 24(Supp1): 33–40. [郭瑛. 活动受限三维水下传感器网络节点定位算法[J]. *软件学报*, 2013, 24(增刊1): 33–40.]
- [23] Luo Hanjiang, Wu Kaishun, Gong Yuejiao, et al. Localization for drifting restricted floating ocean sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(12): 9968–9981.

(编辑 赵 婧)

引用格式: Guo Ying, Wang Jinxin, Han Qinghe. Restricted floating localization in underwater sensor networks[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(5): 183–188. [郭瑛, 王进新, 韩清荷. 受限浮动水下传感器网络定位[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(5): 183–188.]