

基于 DVR 的双馈风电机组不对称电压故障穿越

凌 禹¹, 窦真兰²

(1. 山西大同大学 电气工程系, 山西 大同 037003; 2. 国网上海电力公司电力科学研究院, 上海 200434)

摘要:基于动态电压恢复器 DVR(Dynamic Voltage Restorer)能够在短时间内恢复电压的特点,研究了 DVR 协助双馈风电机组穿越不对称电压故障的能力。针对双馈风电机组,选择了合适的 DVR 拓扑结构及其补偿策略,分析了基于比例-谐振 PR(Proportional-Resonant)控制器的 DVR 控制方法,并提出采用单环电压反馈控制的策略。利用 PSCAD/EMTDC 搭建的详细仿真平台,展示了在 DVR 的保护下双馈风电机组成功穿越不对称电压故障的能力及其改善的瞬态性能。

关键词:双馈感应电机;故障穿越;风力发电;动态电压恢复器;不对称电压故障

中图分类号:TM 614

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.010

0 引言

风电大规模并网运行给电网安全和稳定带来较大的挑战。因此,新的电网导则要求接入电网运行的风电机组应保证具备故障穿越 FRT(Fault Ride-Through)能力,并在故障切除后能向电网提供无功以支撑电网电压的快速恢复^[1]。

所有风电机组都要面对故障穿越问题,而其中双馈风电机组(DFIG)的故障穿越问题最为严重。因其定子绕组与电网直接相连导致的对电网扰动尤其是电压跌落的敏感性,突然的电网电压跌落将使其转子电流幅值高达 5~10 倍额定值甚至更高^[2],极易造成变换器损坏,影响双馈机组的不间断并网运行。因此,提高双馈机组的故障穿越能力已成为当前研究的热点问题。目前,主要的故障穿越技术有改进的矢量控制方案^[3-4]、直接功率控制的改进方案^[5-6]和非线性控制^[7]等。这些方案由于受转子侧变换器能力所限仅能满足机组穿越跌落程度较轻的电压故障。当电压故障严重时,必须求助于额外的硬件电路,如定子串电阻保护^[8]、转子串电阻保护^[9]、撬棒(Crowbar)保护^[10]等。

动态电压恢复器(DVR)具有在短时间(几毫秒)内恢复电压的能力,因此本文考虑采用 DVR 提高双馈机组的故障穿越能力^[11-12]。文献[11]中针对的是恒速异步风力发电机组,文献[12]中研究的是双馈机组,但其重点放在高电压(对称故障)的穿越上。而本文在上述研究的基础上,针对双馈机组这一特定目标,将详细地介绍 DVR 拓扑结构、补偿策略及参数选择,并详细讨论 DVR 的控制策略,提出在静止坐标系下基于比例-谐振(PR)控制器的电

压单环控制策略,使得 DVR 的控制更简单实用,同时其性能未受到实质性的影响。在 DVR 的保护下,双馈机组能够成功穿越不对称电压故障,并获得理想的瞬态特性。最后,基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建的详细仿真平台,验证了所提方案的有效性和可行性。

1 系统结构

基于 DVR 的双馈风电机组系统拓扑结构见图 1。系统主要由风轮、齿轮箱、双馈感应电机、背靠背相连的转子侧变换器(RSC)和网侧变换器(GSC)及变换器保护电路等组成。电机的定子绕组与电网直接相连,转子绕组通过变换器接入电网,以实现机组四象限变速运行。而 DVR 则由注入变压器串入双馈机组和电网之间。双馈机组的控制可参考文献[13],此处不再赘述。

1.1 DVR 结构

由图 1 可知,DVR 由 3 个单相全桥结构组合而成,具有三相之间无耦合、电路相对独立、控制简单、成本低及响应速度快、精度高的优点,缺点是结构分散、体积较大^[14]。为改善补偿能力,直流单元采用储能系统,滤波器则选择常用的 Γ 型低通滤波器。电压正常时,DVR 输出电压为 0,双馈机组在最大功率点跟踪(MPPT)工况下运行;发生不对称故障时,DVR 输出合适的补偿电压,维持双馈机组端电压稳定,起到隔离电压故障的作用。

1.2 DVR 补偿策略选择

依据负荷特点及其控制要求,DVR 的补偿策略有跌落前电压补偿、同相位电压补偿和最小能量补偿^[15]3 种。其中,跌落前电压补偿指补偿后的电压可以完全恢复至电压变化前的值,适用于对相位和幅值变化都很敏感的负荷。双馈机组不仅对电压故障敏感,而且对电压发生故障时产生的相角跳也较为敏感^[16]。因此,本文采用跌落前电压补偿策略。

收稿日期:2017-11-17;修回日期:2018-07-08

基金项目:山西省自然科学基金资助项目(2015011065);大同市基础研究项目(2015112)

Project supported by the Natural Science Foundation of Shanxi Province(2015011065) and Datong Basic Research Project(2015112)

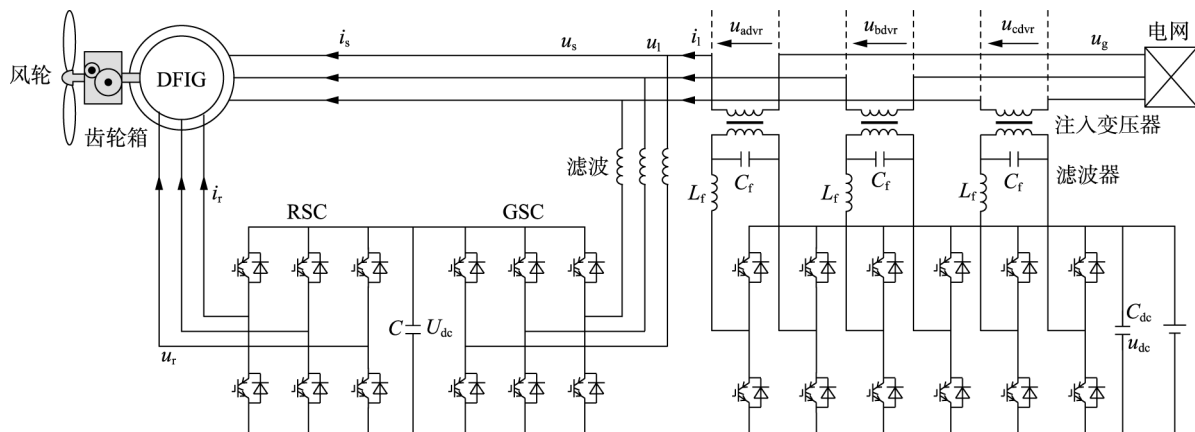


图 1 DVR 保护下的双馈风电机组结构

Fig.1 Topology of DFIG with DVR

1.3 DVR 主电路参数选择

DVR 主电路的参数至关重要。不合适的参数选择,可能会影响 DVR 的补偿性能及成本^[17]。

1.3.1 DVR 额定功率

DVR 的额定功率 P_{DVR} 一般由需补偿电压跌落的深度来确定:

$$P_{DVR} = \frac{U_1 - U_2}{U_1} P_{DFIG} \quad (1)$$

其中, U_1 、 U_2 分别为正常时和故障时的线电压有效值; P_{DFIG} 为双馈电机额定功率。

1.3.2 直流母线电压和电容容量

DVR 是通过逆变产生所需电压的。因此,逆变器交流侧输出单相电压峰值 $U_{i,max}$ 不能小于需补偿电压的峰值 $U_{DVR,max}$, 设变压器变比为 1:1, 有^[17]:

$$U_{i,max} \geq U_{DVR,max} \quad (2)$$

根据逆变器单臂峰值电压输出率的定义,输出的最大单相峰值电压为^[17]:

$$U_{i,max} = (n/N) K_{MVPL} u_{dc} \quad (3)$$

对于图 1 所示 DVR 结构,逆变器可独立控制的相数 $N=3$, 桥臂数 $n=6$, 单臂峰值电压输出率 $K_{MVPL}=0.5$, 由式(2)和式(3)可知:

$$u_{dc} \geq u_{DVR,max} \quad (4)$$

为稳定电压突变时直流侧电压, 电容容量须满足^[17]:

$$C_{dc} \geq \Delta P_{max} t_{s,max} / (u_{dc} \Delta u_{dc,max}) \quad (5)$$

其中, ΔP_{max} 为 DVR 电路功率损耗的最大变化量; $t_{s,max}$ 为电压控制环最大调节时间; $\Delta u_{dc,max}$ 为允许的直流电压波动最大值。

1.3.3 输出滤波器参数

为了尽可能地减小电感支路上的基波压降, 并提高 DVR 的响应速度, 应尽量选择较小电感值。因此, 可根据下式给出的条件初步选出电感值^[15]:

$$U_{Lf} = \omega_1 L_f I_e \leq k U_e \quad (6)$$

其中, U_{Lf} 为滤波电感基波压降; U_e 、 I_e 分别为 DVR 额定电压和电流; ω_1 为基波频率; k 取值 5%~20%。

确定滤波电感后, 可依据滤波器谐振频率必须远大于电网频率的条件选出滤波电容的值, 即:

$$\omega_1^2 L_f C_f \leq 1 \quad (7)$$

需注意的是, 在电路的实际应用中, 还需对理论值做适当调整, 以保证滤波效果。

2 DVR 数学模型及其控制策略

2.1 DVR 数学模型

在图 1 所示的 DVR 结构中, 忽略变压器的励磁电流和漏抗, 设变比为 1:1, 不考虑负载特性的差异, 其可等效为一电流源。DVR 简化模型如图 2 所示。依此可得其状态方程^[14,17]:

$$C_f \frac{du_{Cf}}{dt} = i_{Cf} = i_{Lf} - i_1 \quad (8)$$

$$L_f \frac{di_{Lf}}{dt} = -i_{Lf} R_f - u_{Cf} + u_i \quad (9)$$

其中, u_{Cf} 为滤波电容两端的电压; R_f 为等效电阻; u_i 为逆变器输出电压; i_1 为负荷电流。

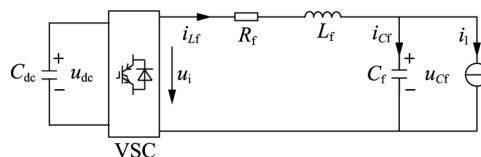


图 2 DVR 简化模型

Fig.2 Simplified model of DVR

2.2 静止坐标系下 DVR 的电压控制策略

据统计, 在实际的电力系统中, 不对称电压故障发生的概率更高。因此, 利用 DVR 补偿不对称电压故障也深受科研人员的关注。然而, 基于 PI 控制器的传统矢量控制在电网不平衡电压故障时, DVR 对其补偿的效果不是特别理想, 造成此状况的原因主

要是不对称电压跌落时,电网电压中除正序分量外还含有负序分量,2个分量频率相同但旋转方向相反^[18]。在通常的正向同步旋转坐标系下,这个负序电压 dq 分量仍然是一个交流量,这对于传统的直流PI调节器而言是无能为力的。

为了提高DVR补偿不对称电压跌落的性能,从而加强双馈风电机组穿越不对称电压故障的能力,以解决电磁转矩、有功功率的2倍频振荡和直流侧纹波问题,有必要对系统电压的负序分量进行控制。通常有以下3种途径:同步旋转坐标系下基于PR控制器的矢量控制技术,同步旋转坐标系下基于双序坐标变换的矢量控制技术,静止坐标系下基于PR控制器的矢量控制技术。然而,前2种方法均需坐标变换,尤其是同步坐标系下的双序坐标变换技术更加复杂,并且还需要分离正、负序分量,而这种分离需要一定的时间,例如50 Hz的电网电压有的需要5 ms^[18],更短的有2 ms^[19],这个时间对快速性要求较高的DVR而言有重要影响。

因此,本文建议采用静止坐标系下基于PR控制器的矢量控制技术。该方法最大的特点是可以直接在静止坐标系下对交流信号实现无静差调节,从而省去繁琐的静止到同步的坐标变换,不用单独考虑负序分量的控制,仅在两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系中通过合理设计单一的PR控制器,即可完成对整个DVR输出电压正、负序分量的统一调节,从而实现DVR快速精确补偿不对称电压故障的控制目标。可见,其控制结构简单,有利于工程实现。

2.2.1 DVR补偿电压参考

按照跌落前电压补偿法,DVR补偿电压的参考值 $u_{\alpha\beta dvr,ref}$ 为:

$$u_{\alpha\beta dvr,ref} = u_{\alpha\beta g,ref} - u_{\alpha\beta g} \quad (10)$$

其中, $u_{\alpha\beta g,ref}$ 、 $u_{\alpha\beta g}$ 分别为电网电压参考值和电网电压;“ $\alpha\beta$ ”表示同步旋转坐标系。

2.2.2 静止坐标系下基于PR控制器的DVR电压控制

文献[20]详细分析了PR控制器。PR控制器由比例和谐振2种控制器构成。其中,谐振控制器即为广义积分器。实际上,谐振控制器是由正、负序理想交流积分器(即广义积分器)经过叠加而成,只不过正序分量通过负序理想交流积分器调节后的成分和负序分量通过正序理想交流积分器调节后的输出结果均非常小而被忽略了。可见,谐振控制器对正、负序分量的调节效果相同。

正是基于上述机理,当电网电压发生不对称故障时,基于两相静止坐标系,PR控制器可直接用于不平衡电网下DVR输出补偿电压的控制,以确保双馈风电机组被隔绝于不对称电压故障之外,从而协助双馈机组成功穿越不对称电压故障,并改善双馈

风电机组的瞬态性能。

PR控制器具有基波频率处增益无穷大、其他频率信号处衰减作用强的特点。因此,PR控制器在基波频率 ω_b 处可实现零稳态误差。其传递函数为:

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{K_r s}{s^2 + \omega_b^2} \quad (11)$$

其中, K_p 为比例系数; K_r 为谐振增益。

式(11)是理想PR控制器的传递函数,其对频率波动较为敏感,可用非理想PR控制器代替,其传递函数为^[21]:

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_b^2} \quad (12)$$

式(12)给出的控制器有3个设计参数,分别为比例系数 K_p 、谐振增益 K_r 和截止频率 ω_c 。其中, K_r 只影响谐振控制器的增益, ω_c 不仅影响PR控制器的增益,还影响PR控制器的带宽。

PR和PI控制器的伯德图如图3所示。图3中虚线波形为非理想PR控制器传递函数的伯德图。在选择谐振频率处,其幅频特性不再是无穷大,但仍高达40 dB,完全可以实现小的稳态误差。在稳态时的补偿输出幅值和相位误差仍可近似认为是0。此外,对比图3中实线所示的PI控制器传递函数伯德图,除了谐振频率附近,这2种控制器伯德图的幅值和相位几乎没有太大差别。

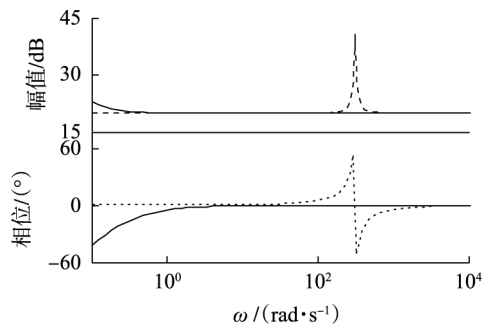


图3 PR和PI控制器的伯德图

Fig.3 Bode diagram of PI and PR controllers

可见,基于PR控制器,在静止坐标下,当不引入任何电压正、负序分量分解环节时,DVR输出电压控制方程为:

$$u_{\alpha\beta i,ref}(s) = (u_{\alpha\beta dvr,ref}(s) - u_{\alpha\beta dvr}(s)) G_{PR}(s) \quad (13)$$

可得完整的DVR电压单闭环控制示意图如图4所示。

3 仿真实验

为了验证所提方案改善双馈机组穿越不对称电压故障的能力,基于PSCAD/EMTC搭建了如图1所示的模型,并进行了仿真分析。相关参数见附录A。在仿真中,故障从8 s开始、持续200 ms,风速为11.5 m/s。下文各变量除直流侧电压外均为标么值。

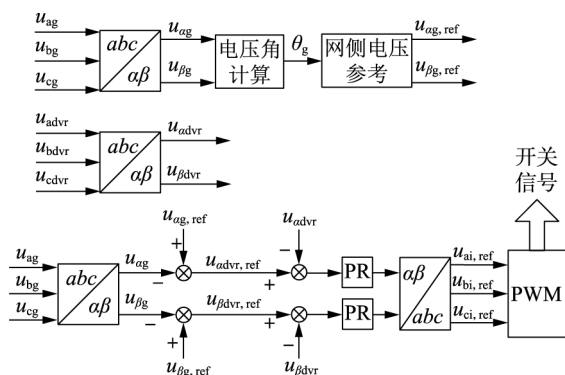


图 4 静止坐标系下 DVR 控制框图

Fig.4 Block diagram of DVR control in stationary frame coordinate system

图 5 为单相对地故障(小值跌落)时 DVR 补偿不对称电压能力的仿真结果。可见,DVR 能很好地补偿 a 相发生的对地故障电压。尽管 DVR 输出电压中,b、c 两相电压幅值和相角在故障期间也有所变化,但从负荷侧的电压波形来看,基本上恢复到了故障前的水平,能保证双馈机组成功穿越该故障,同时也能够很好地改善双馈机组故障期间的瞬态特性。这能从图 6 所示的双馈机组故障期间各量瞬态响应中看出。由图 6(a)可看出,故障期间转子电流幅值被抑制且三相对称,仅电流谐波有所增加。由图 6(b)~(e)可看出,在 DVR 的保护下,双馈机组在不对称故障期间各量的瞬态特性良好,尤其是电磁转矩、电机有功输出的 2 倍频波动问题得以基本解决,同时直流侧母线电压的纹波也被有效抑制。

图 7 为 DVR 输出有功、无功波形。可见,DVR

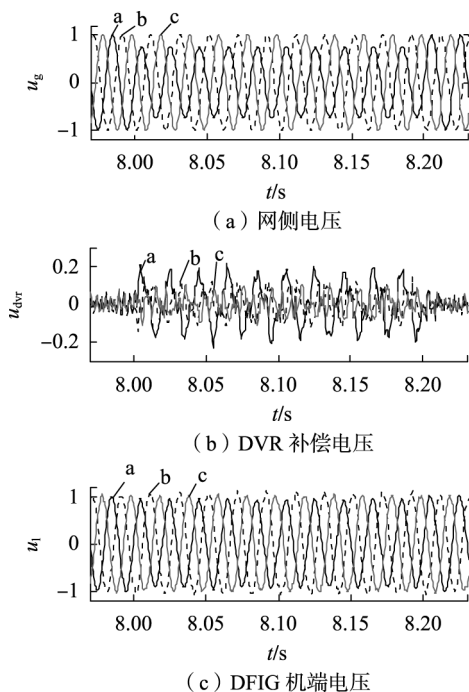


图 5 电压波形

Fig.5 Voltage waveforms

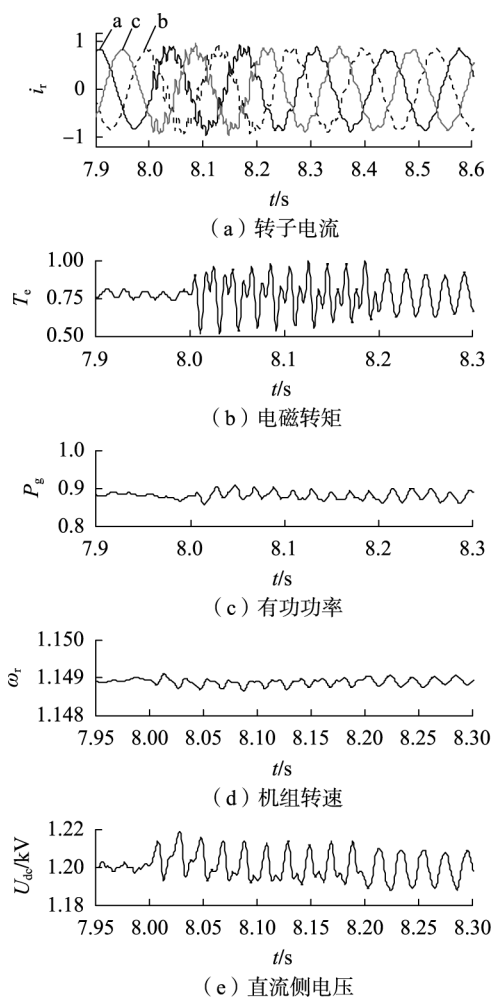


图 6 DVR 保护下双馈机组故障期间瞬态响应

Fig.6 DFIG transient behaviors with DVR

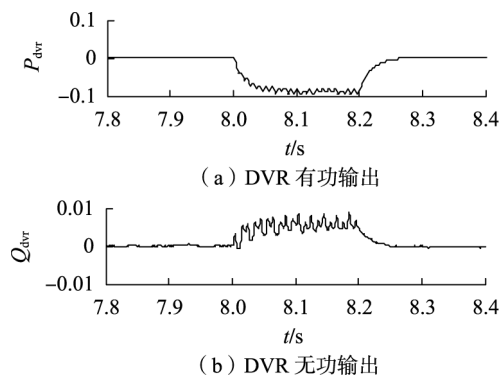


图 7 DVR 有功和无功功率

Fig.7 Active and reactive power of DVR

仍需吸收多余的有功(约 0.1 p.u.)以平衡不对称故障期间的能量不平衡,同时还向系统提供了少量无功。

在实际的电力系统中,两相对地短路故障(大值跌落)也时有发生。为此,也进行了两相对地电压跌落时的仿真。在仿真中,风速 11.5 m/s,a、b 两相网侧电压在 8 s 时发生对地电压故障,200 ms 后故障被清除。

图8为两相对地电压跌落时的网侧电压、DVR输出电压及负荷侧电压波形。从图中负荷侧电压波形可见,DVR能很好地补偿两相对地电压故障,但和单相对地故障时相比,补偿后的电压质量略有下降。

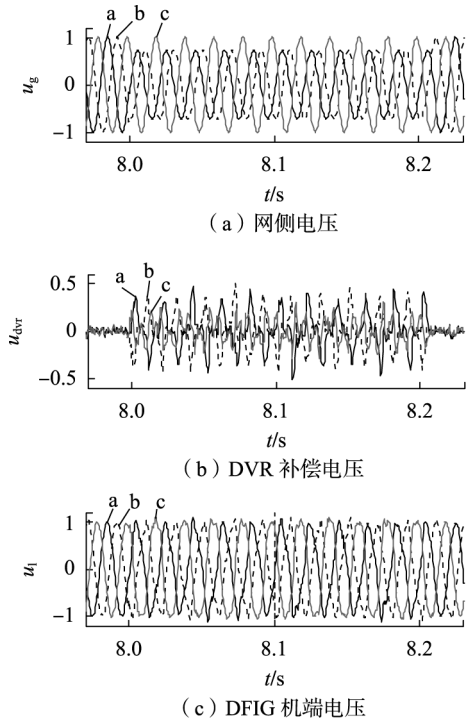


图8 电压波形

Fig.8 Voltage waveforms

在DVR的保护下,双馈机组在遭受两相不对称电压跌落时的转子瞬态特性如图9(a)所示。可见,除转子电流谐波比单相接地故障时增加外,振荡幅值仍较小,且三相电流基本对称。这与单相对地故障时所得结论基本一致。由图9(b)~(e)可知,尽管双馈机组遭受的是网侧电压大值跌落的故障,但双馈机组不仅能成功穿越该电压故障,而且其瞬态特性依然很好,尤其是电磁转矩和输出有功的2倍频振荡被基本抑制,也很好地改善了直流纹波。但和单相接地故障时相比,各量的振荡幅值有所增加。

两相对地电压故障时的DVR输出有功和无功的波形如图10所示。可见,DVR消耗了不平衡电压故障引起的约0.2 p.u.的多余能量。同时,和单相接地故障一样,此时DVR还需向系统提供无功功率约0.05 p.u.,比单相接地时多提供约0.04 p.u.。这正是双馈机组动态性能改善的根本原因。

从上述仿真分析可以看出,在采用基于PR控制器的电压单环控制策略条件下,DVR对于不对称电压跌落亦有很好的补偿效果,具有令人满意的动态和稳态特性。因此,在DVR的保护下,双馈风电机组不仅能成功穿越不对称电压故障,而且其在故障期间的瞬态特性大为改善,尤其是电磁转矩、有功输出的2倍频振荡基本被抑制,直流侧母线电压纹

波问题也得以解决。因此,基于DVR的故障穿越方案是一种具有工程实际应用前景的方法,值得进一步深入探讨和研究。

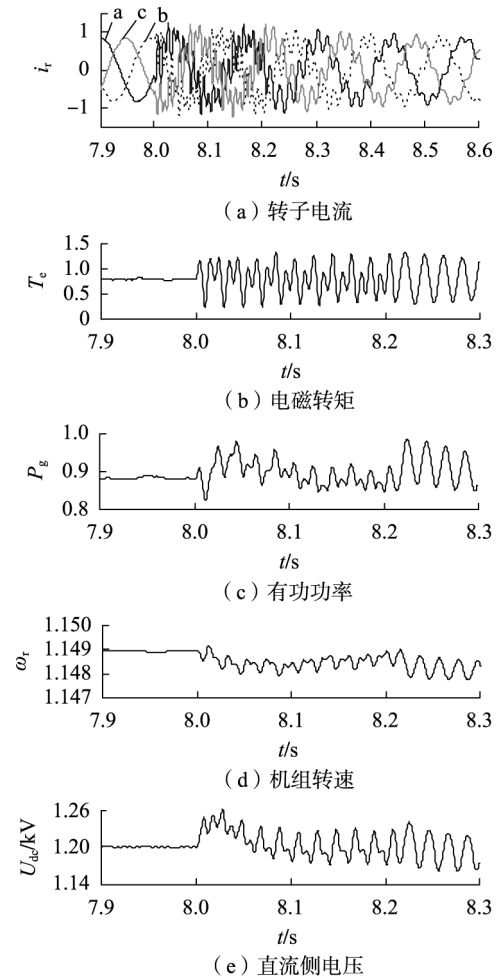


图9 DVR保护下双馈机组故障期间瞬态响应

Fig.9 DFIG transient behaviors with DVR

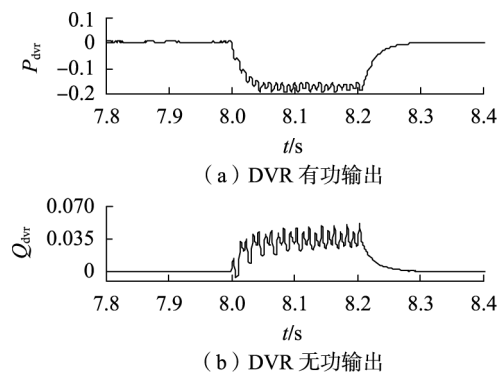


图10 DVR有功和无功功率

Fig.10 DVR active and reactive power

4 结论

DVR能在几个毫秒内恢复负荷侧电压至故障前的水平。因此,对于双馈机组而言,DVR是一种有效的故障穿越方案。然而,DVR的电压补偿能力很大程度上依赖于其控制器。因此,本文针对双馈

机组,首先分析了 DVR 拓扑结构、补偿策略及参数选择,重点讨论了在静止坐标系下基于 PR 控制器的电压单环控制策略,最后通过仿真验证了所提方案的有效性。在 DVR 的保护下,双馈机组不仅能成功穿越不对称电压故障,而且故障期间双馈机组的瞬态性能得到了极大改善。其根本原因在于,该方案中 DVR 起到了隔绝电压故障的作用,电压故障几乎未影响双馈机组的运行,是一种主动的故障穿越方案。

但基于 DVR 的故障穿越方案最大的缺点是成本较高,限制了其广泛应用。因此,如何降低 DVR 的容量和成本也是个紧迫的研究课题。但对于已建但又无故障穿越能力的风电机组而言不失为一种好的选择。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 关宏亮,赵海翔,迟永宁,等. 电力系统对并网风电机组承受低电压能力的要求[J]. 电网技术,2007,31(7):78-82.
GUAN Hongliang, ZHAO Haixiang, CHI Yongning, et al. Requirement for LVRT capability of wind turbine generator in power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 78-82.
- [2] LING Yu, CAI Xu, WANG Ningbo. Rotor current transient analysis of DFIG-based wind turbines during symmetrical voltage faults[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 76(1): 910-917.
- [3] 蔚兰,陈国呈,宋小亮,等. 一种双馈感应风力发电机低电压穿越的控制策略[J]. 电工技术学报,2010,25(9):170-175.
YU Lan, CHEN Guocheng, SONG Xiaoliang, et al. A low voltage ride-through of strategy for doubly fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 170-175.
- [4] XIANG D, RAN L, 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 Conversion, 2006, 21(3): 652-662.
- [5] 张迪,魏艳君,马利轩,等. 不平衡电网电压下基于滑模变结构控制的双馈风电系统网侧变流器控制策略[J]. 电工技术学报,2015,30(10):266-275.
ZHANG Di, WEI Yanjun, MA Lixuan, et al. Sliding-mode control for grid-side converters of DFIG-based wind-power generation system under unbalanced grid voltage conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 266-275.
- [6] NIAN Heng, SONG Yipeng, ZHOU Peng, et al. Improved direct power control of a wind turbine driven doubly fed induction generator during transient grid voltage unbalance[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(3): 976-986.
- [7] RAHIMI M, PAMIANI M. Transient performance improvement of wind turbines with doubly fed induction generators using nonlinear control strategy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 514-525.
- [8] 凌禹,蔡旭,汪宁渤. 定子撬棒和直流侧卸荷电路协调的故障穿越技术研究[J]. 中国电力,2013,46(12):90-94.
LING Yu, CAI Xu, WANG Ningbo. Combination of stator crowbar and DC-link discharge resistor for Fault Ride-Through (FRT) of DFIG[J]. Electric Power, 2013, 46(12): 90-94.
- [9] 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.
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.
- [10] 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.
- [11] 洪芦诚,魏应冬,姜齐荣,等. 基于动态电压调节器的风电机组低电压穿越策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(16):32-37.
HONG Lucheng, WEI Yingdong, JIANG Qirong, et al. Low voltage ride through strategy for wind turbine systems using dynamic voltage restorers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 32-37.
- [12] WESSELS C, FUCHS F W. High voltage ride through with FACTS for DFIG based wind turbines[C]//The 13th European Conference on Power Electronics and Applications. Barcelona, Spain: IEEE, 2009: 1-10.
- [13] 马祎炜,俞俊杰,吴国祥,等. 双馈风力发电系统最大功率点跟踪控制策略[J]. 电工技术学报,2009,24(4):202-208.
MA Yiwei, YU Junjie, WU Guoxiang, et al. MPPT control strategy for doubly-fed wind power generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 202-208.
- [14] 赵艳雷. 动态电压恢复器逆变单元的研究与实现[D]. 北京:中国科学院电工研究所,2006.
ZHAO Yanlei. The research and implementation of dynamic voltage restorer inverter unit[D]. Beijing: Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [15] 克长宾. 动态电压恢复器的控制及补偿策略研究[D]. 天津:天津大学,2011.
KE Changbin. Study on control and compensation strategy of dynamic voltage restorer[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [16] MOHSENI M, ISLAM S M, MASOUM M A S. Impacts of symmetrical and asymmetrical voltage sags on DFIG-based wind turbines considering phase-angle jump, voltage recovery, and sag parameters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(5): 1587-1598.
- [17] 王凯斐,卓放,王兆安. 动态电压恢复器电路拓扑分析及参数设定[J]. 电力自动化设备,2004,24(4):19-23.
WANG Kaifei, ZHUO Fang, WANG Zhaoan. Study on circuit topology and parameters of three-phase dynamic voltage restorer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(4): 19-23.
- [18] 曹伟. 基于电压矢量控制的动态电压恢复器的仿真研究[D]. 南宁:广西大学,2009.
CAO Wei. Simulation research of dynamic voltage restorer based on voltage vector control[D]. Nanning: Guangxi University, 2009.
- [19] LIANG Y. A new time domain positive and negative sequence component decomposition algorithm[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. Toronto, Ont., Canada: IEEE, 2003: 1638-1643.
- [20] 胡家兵. 双馈异步风力发电系统电网故障穿越(不间断)运行研究——基础理论与关键技术[D]. 杭州:浙江大学,2009.
HU Jiabing. Investigation on the ride-through operation of DFIG-based wind power generation systems during grid fault-basic theory and key technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.

(下转第77页 continued on page 77)

- [22] 杨天,王京波,宋少帅,等. 考虑风速相关性的电力系统动态经济调度[J]. 电工技术学报,2016,31(16):189-197.
YANG Tian, WANG Jingbo, SONG Shaoshuai, et al. Dynamic economic dispatch of power system considering the correlation of the wind speed[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016,31(16):189-197.
- [23] DOMÍNGUEZ R, CONEJO A J, CARRIÓN M. Operation of a fully renewable electric energy system with CSP plants[J]. Applied Energy, 2014, 119(12):417-430.
- [24] 刘淳安. 动态多目标优化进化算法及其应用[M]. 北京:科学出版社,2011:25-32.

作者简介:



崔 杨

163.com)。

崔 杨(1980—),男,内蒙古包头人,教授,博士,主要研究方向为电力系统运行分析、新能源联网发电关键技术等(E-mail: cuiyang0432@163.com);

杨志文(1992—),男,山东滨州人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为光热发电并网运行控制(E-mail: yangzhiwen611@

Day-ahead dispatch for output of combined CSP with thermal storage system and thermal power units based on minimized operation cost

CUI Yang¹, YANG Zhiwen¹, ZHONG Wuzhi², ZHAO Yuting¹, YE Xiaohui²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: CSP (Concentrating Solar Power) with thermal storage systems is advantageous in terms of effective controllability and dispatch ability. Optimal dispatching of CSP contributes to reduced operation cost of the power system. To minimize the operation cost, combined optimal dispatch of CSP with thermal storage system and thermal power units is proposed with the consideration of solar power conversion characteristics and operation constraints. This strategy considers the generation cost of thermal unit, the environmental benefits and the operation and maintenance costs added by the connection of CSP to the grid, system spinning reserve cost, and secure operation constraints, for which the optimal dispatch strategy of CSP with given thermal storage is obtained. The model is solved using genetic algorithm, and the effectiveness of the proposed method is verified by simulative results of IEEE 30-bus system.

Key words: minimized operation cost; thermal storage plant; concentrating solar power plant; thermal power unit; dispatch strategy

(上接第70页 continued from page 70)

- [21] JIN K M, THINH Q H, KIM E H. DVR control of DFIG for compensating fault ride-through based on stationary and synchronous reference frame[C]//7th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC). Harbin, China: [s.n.], 2012:3004-3009.

作者简介:

凌 禹(1975—),男,山西阳高人,副教授,博士,主要研



凌 禹

究方向为风力发电及其控制等(E-mail: pleasurely@126.com);

窦真兰(1980—),女,江苏泰州人,高级工程师,博士,主要研究方向为节能减排及新能源等(E-mail: zhenldou@126.com)。

Asymmetrical voltage fault ride-through of wind turbine with DFIG using DVR

LING Yu¹, DOU Zhenlan²

(1. Department of Electrical Engineering, Shanxi Datong University, Datong 037003, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200434, China)

Abstract: Based on the characteristics that DVR (Dynamic Voltage Restorer) can restore voltage in a short time, the capability of DVR to assist DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) wind turbines for the improvement of asymmetrical voltage fault ride-through is investigated. For DFIG wind turbines, the topology and compensation strategy of DVR are selected. The DVR control method based on proportional-resonant controller is analyzed and a single-loop voltage feedback control strategy is proposed. The simulation experiments are performed with PSCAD/EMTDC. Results show that DFIG wind turbines can successfully ride through asymmetrical voltage faults under DVR protection and its improved transient behaviors.

Key words: Doubly-Fed Induction Generator (DFIG); fault ride-through; wind power generation; Dynamic Voltage Restorer (DVR); asymmetrical voltage fault

附录 A

DFIG 参数: 额定功率 2 MW, 额定电压 690 V, 频率 50 Hz, $R_s = 0.00488$ p.u., $L_{ls} = 0.1386$ p.u., $R_r = 0.00549$ p.u., $L_{lr} = 0.1493$ p.u., $L_m = 3.9$ p.u., 惯性时间常数 3.5 s, 匝间比 0.45。

DVR 参数: 额定容量 3×0.8 MW, 直流侧电容 $C_{dc} = 8200$ μ F, 滤波电感 $L_f = 0.03$ mH, 滤波电容 $C_f = 10000$ μ F, 注入变压器容量 0.8 MV A, 注入变压器电压 690/690 V。

PR 控制器参数: 比例增益 $K_p = 22$, 谐振增益 $K_r = 15$, 截止频率 $\omega_c = 2.6\pi$ rad/s。