

储能型直驱永磁同步风力发电控制系统

王文亮¹, 葛宝明¹, 毕大强²

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 电力系统国家重点实验室, 清华大学电机系, 北京 100084)

摘要: 为提高直驱永磁风力发电系统的性能, 在直流侧增加新型钒氧化还原液流电池 (VRB) 储能装置。设计了相应的双向 DC/DC 变换器控制策略, 在风速变化时, VRB 能够通过快速充放电平抑系统发电机输出功率波动以及平衡电网需求功率; 在电网电压跌落时, 还可提高低电压穿越能力。对具有储能电池的风力发电系统建立了仿真模型, 详细分析了系统在风速变化、电网需求功率变化以及电压跌落时的动态响应过程和运行特性, 并给出了仿真验证。仿真结果表明, 在直流侧加 VRB 储能装置, 有效地提高了直驱风电系统并网运行性能和低电压穿越能力, 系统动态响应速度快。

关键词: 直驱风电系统; 永磁同步发电机; 储能电池; 钒氧化还原液流电池; 低电压穿越

Energy storage based direct-drive permanent magnet synchronous wind power control system

WANG Wen-liang¹, GE Bao-ming¹, BI Da-qiang²

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Key Lab of Power System, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To enhance the performance of direct-drive permanent magnet wind power generation system, a new type of vanadium redox flow battery (VRB) energy storage system (ESS) is added at DC-side of the converter. Correspondingly, the control strategy of bi-directional converter is developed. VRB ESS can quickly charge and discharge so that it can smooth the fluctuation of generator output power and balance the demand for power grid when the wind rapidly changes; while the voltage grid dips, it can also improve the ability of LVRT. The simulation model is established, and the dynamic response process and operation characteristics are analyzed in detail. The simulation results show that the performances of grid connected operation and LVRT are effectively improved for the direct-drive wind power system by adding VRB ESS at the DC-side, and the dynamic respond speed of system is fast.

This work is supported by grants from the Power Electronics Science and Education Development Program of Delta Environmental & Educational Foundation(No.DREG2009006) and State Key Lab of Power System(No.SKLD09KZ10).

Key words: direct-driven wind power system; permanent magnet synchronous generator; energy storage battery; vanadium redox flow battery (VRB); low voltage ride through (LVRT)

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)14-0043-06

0 引言

大规模风力发电一般直接并网运行, 随着风力发电规模的不断增大, 电网对风力发电的电能质量要求越来越高, 风电场的运行对电网稳定性的影响将不容忽视。

发电机输出功率取决于风速, 由于风速具有不可控性、不可预期性和随机波动特性, 导致输出功率波动大, 随机波动的功率接入电网会对电网运行

的稳定性及经济性带来负面影响^[1], 因此风力发电并网功率随机波动问题亟待解决。另一方面, 在欧洲风电技术超前的一些国家制定了新电网运行准则, 要求只有当电网电压跌落低于规定曲线以后才允许风力机脱网, 这就要求风电系统具有较强的低电压穿越能力, 并能方便地为电网提供无功支持。直驱永磁风力发电系统在电压跌落时, 可以只在网侧变换器和直流侧采取对应措施, 如在直流侧增加卸荷负载或储能装置, 来提高低电压穿越能力^[2-3], 使电机侧变换器及电机系统能够正常运行不受影响, 这是永磁直驱风电系统的低电压穿越能力优于

基金项目: 台达电力电子科教发展计划基金 (DREG2009006) 和电力系统国家重点实验室项目 (SKLD09KZ10) 资助。

双馈式系统之处^[4]。文献[4]中采用在直流侧加卸荷载提高系统低电压穿越能力，电压跌落时，直流侧多余的能量纯粹被浪费掉了，且需要大负载并提供散热。文献[5-6]中说明通过控制网侧变换器，可以在一定程度上提高低电压穿越能力，但是提高的水平有限。文献[7]说明在直流侧和电网之间增加辅助变换器可以提高低电压穿越能力，但要增加功率等级更大的辅助变换器，在故障发生和结束时要进行网侧变换器和辅助变换器之间的切换，成本相对较高，控制也比较复杂。本文采用在直流侧加储能电池提高低电压穿越能力，当电压跌落时，多余的能量被储存，直流侧电压不足时，储能电池放电为电容充电，可以实现能量再利用，能够较好地保持直流侧电压的稳定，并且能用存储的能量为电网提供一定的功率支持。

性能优良的储能电池与大规模风力发电配套使用，是改善电力系统运行性能的重要手段。钒氧化还原液流电池（VRB）相对其它储能电池（如铅酸电池、钠硫电池等）有许多优点，如寿命长，快速响应，低维护，在室温下运行，材料低廉，更换和维修费用低，额定功率和额定能量相互独立等，适合大规模电力储能，是一种潜力巨大的新型环保优秀储能电池^[8-10]。

因此，本文构建在直流侧增加侧钒电池储能装置的直驱永磁风力发电系统，设计双向 DC/DC 变换器的控制策略，详细分析了储能系统对平抑电机输出功率波动、平衡电网需求功率以及当电压跌落时提高机组低电压穿越能力的动态响应过程和运行特性，并通过仿真验证了系统模型和控制策略的正确性和可行性。

1 最大风能跟踪控制原理

风力机从风能中捕获的功率 P_w 可表示为：

$$P_w = 0.5\rho AC_p v^3 \quad (1)$$

式中： ρ 为空气密度； A 为风力扫过的面积； v 为风速； C_p 为风能利用系数，在桨距角一定的情况下，是叶尖速比 λ 的函数： $\lambda = \omega R / v$ ， ω 为风力机的机械角速度， R 为风轮半径。

为仿真方便， C_p 采用文献[2]中的表达式：

$$\gamma = 1 / \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \quad (2)$$

$$C_p = 0.22(116/\gamma - 0.4\beta - 5)e^{-12.5/\gamma} \quad (3)$$

当桨距角 β 保持不变时，风力机输出功率系数 C_p 仅由叶尖速比 λ 决定。使风力机运行于最佳叶尖速比 λ_{opt} 就可以得到最大风能利用系数 C_{pmax} ，此时

风力机转换效率最高。对于一台确定的风力机，在一个特定风速下，应使风力机运行在某一特定的转速下得到最佳叶尖速比，实现最大风能捕获；在不同的风速下，总有一个与最大风能利用系数相对应的最佳叶尖速比。把各风速下对应的最大输出功率点连起来形成一条最佳功率曲线。要跟踪最佳功率曲线，获得最大风能，就要在风速变化时及时调节风轮机的转速，保持最佳叶尖速比，实现最大功率跟踪^[11-12]。

图 1 是基于爬山法的最大功率跟踪点控制算法原理图，其中捕获的风能 $P_w = T_w * \omega$ ， T_w 为风机机械转矩； ω 为风力机旋转速度（也是发电机的机械角速度，因为风力机与永磁电机同轴相连）； $\Delta\omega$ 是转速调节步长。 $\Delta P_w(n) = P_w(n) - P_w(n-1)$ ， $\Delta\omega(n) = \omega(n) - \omega(n-1)$ 。通过不断地检测功率和转速变化对转速进行调节，使其运行在最大功率点上，从而使系统输出最大功率。

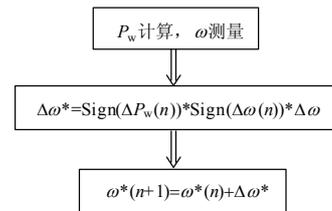


图1 基于爬山法最大功率跟踪控制原理图

Fig.1 MPPT control principle based on the climbing method

2 储能型直驱永磁风电系统原理

具有储能环节的直驱永磁风力发电系统主要由风力机、PMSG、双 PWM 变换器、双向 DC/DC 充电器、储能装置和电抗器等构成，如图 2 所示。发电机首先将风能转化为频率和幅值变化的交流电，通过整流后变为直流，然后再经过三相逆变器转换为三相电压和频率恒定的交流电传递到电网上。直

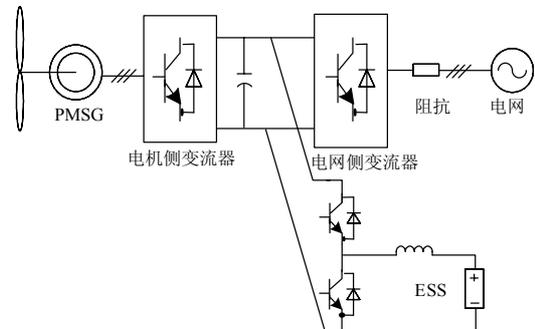


图2 直流侧加储能装置的直驱永磁风电系统

Fig.2 Direct-drive permanent magnet wind power system with ESS at DC-side

流侧加储能装置对电能进行储存或释放, 可用来平抑发电机输出功率波动给电网提供稳定的功率, 平衡电网要求的功率; 当电网发生故障时, 储能装置还可以用来储存直流侧积累的多余能量, 提高低电压穿越能力等。

2.1 发电机侧变换器控制策略

永磁同步电机在同步旋转坐标系 dq 中定子电压和磁链方程为:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_d - \omega\psi_q \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_q + \omega\psi_d \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_{sd} + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_{sq} \end{cases} \quad (5)$$

其中: u_{sd} , u_{sq} 分别为 d, q 轴电压; i_{sd} , i_{sq} 分别为 d, q 轴电流; L_d , L_q 分别为定子直轴电感、交轴电感; ψ_f 为永磁体励磁磁链 (为一常数); ψ_d , ψ_q 分别为 d, q 轴磁链; ω 为电气角速度; R_s 为定子相电阻。

若设置电机 d 轴电流为 0, 则永磁同步发电机电磁转矩方程可简化为:

$$T_e = 1.5n_p i_{sq} \psi_f \quad (6)$$

其中: n_p 是发电机极对数; ψ_f 是电机转子磁链。

从式 (6) 可以看出电机转矩可直接由交轴电流分量 i_{sq} 来进行控制。

图 3 是永磁同步发电机侧变换器的控制原理图, 通过控制 d, q 轴电流可以实现电磁转矩与无功的解耦控制。外环是速度环, $f(P_w \omega)$ 的输入量为转速 ω 和输出功率 P_w , 通过最大功率跟踪算法确定电机的转速参考值 ω^* ; 电流环采用 PI 调节, 增加电压补偿量实现解耦, 提高动态响应速度^[13-14]。

2.2 电网侧变换器的控制策略

在两相同步旋转坐标系 dq 中, 将电网侧电压空间矢量 u_g 定向为 d 轴, 电网侧变换器的电压方程为:

$$u_d - u_{gd} = Ri_d + L(di_d / dt) - \omega Li_q \quad (7)$$

$$u_q = Ri_q + L(di_q / dt) - \omega Li_d \quad (8)$$

其中: R , L 为电抗器的电阻和电感; u_d , u_q , i_d , i_q 分别为网侧变换器 d、q 轴电压、电流分量。

网侧变换器的有功功率和无功功率为:

$$P = 1.5u_{gd}i_d \quad (9)$$

$$Q = 1.5u_{gd}i_q \quad (10)$$

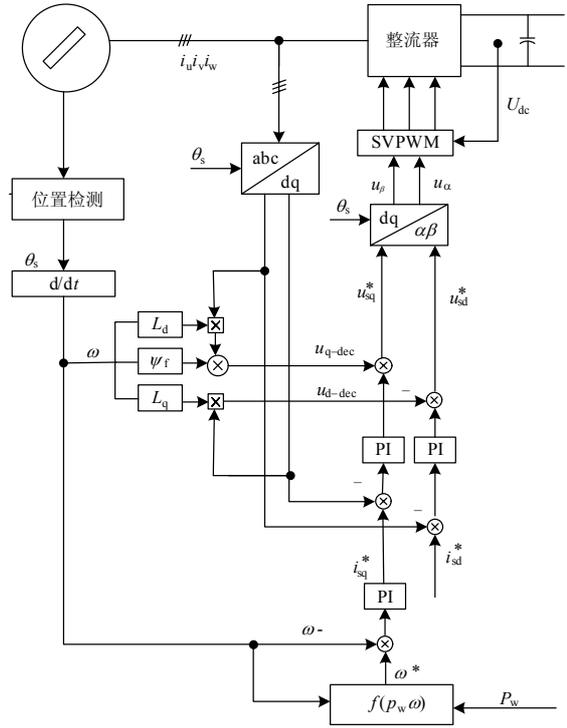


图 3 发电机侧变换器的控制原理图

Fig.3 Control principle diagram of generator-side converter

图 4 是电网侧变换器原理图。通过控制电网电流的 d, q 轴分量, 可以实现 P 和 Q 的独立控制。外环是直流电压环, 内环是电流环, 通过控制电网侧变换器, 维持直流侧电压恒定, 使电机发出的有功功率全部流入电网, 实现有功功率传输; 以及控制流向电网的无功功率^[13-14]。

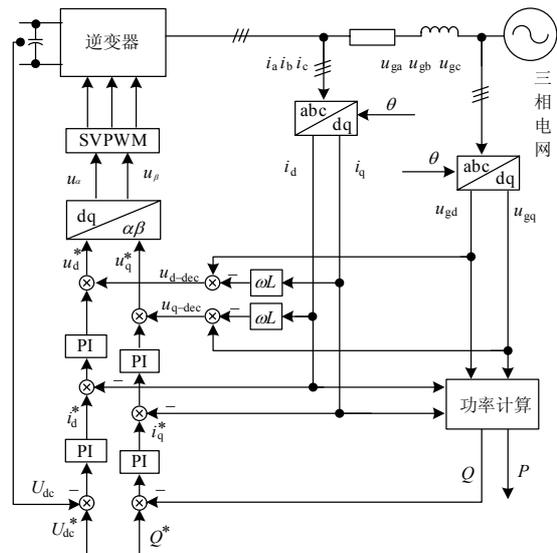


图 4 电网侧变换器控制原理图

Fig.4 Control principle diagram of grid-side converter

2.3 储能环节控制策略

图5是本文提出的在直流侧增加钒电池储能装置双向DC/DC充电器控制原理图。其中， P_s 是永磁同步电机输出功率； P_g 是电网从风电系统中吸收的功率； ΔP 为直流侧输入输出有功功率偏差； I_B^* 是电池充放电电流的给定值； I_B 是电池充放电电流。

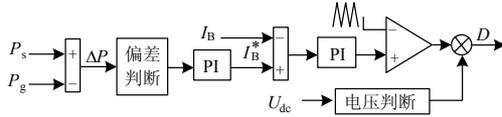


图5 直流侧双向DC/DC变换器充电控制原理图

Fig.5 Control principle diagram of bi-directional DC/DC converter at DC-side

当直流侧输入输出有功功率存在偏差 ΔP 时， ΔP 经过偏差判断后，由PI调节得到电池充电电流给定值 I_B^* ，然后电池的实际充电电流 I_B 与 I_B^* 比较，

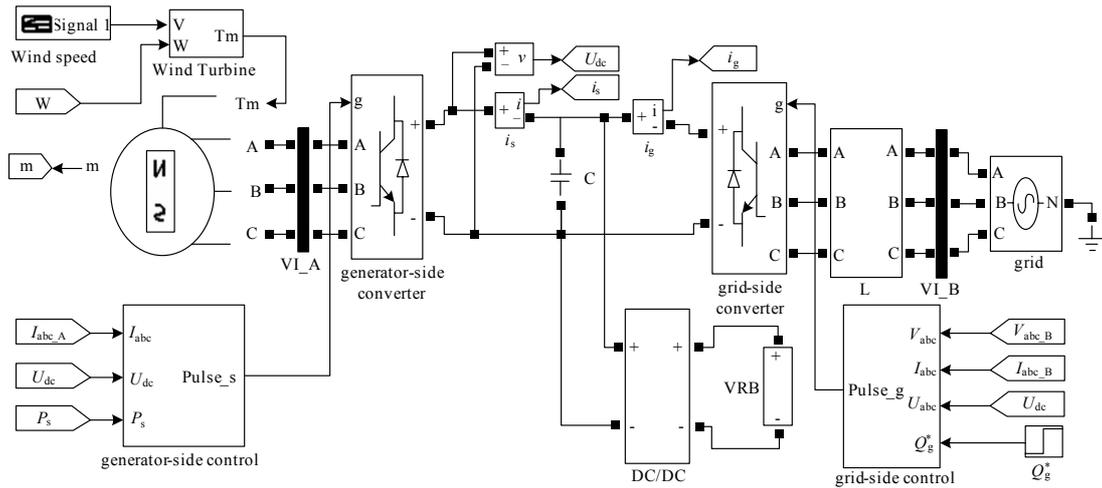


图6 储能型直驱永磁风电系统仿真模型

Fig.6 Simulation model of direct-drive permanent magnet wind power system with VRB ESS at DC-side

系统仿真参数如下：①模拟风力机：空气密度 1.225 kg/m^3 ，风轮半径 24 m ，桨距角 0° ；②永磁同步发电机：定子电阻 0.017Ω ，定子电感 3 mH ，极对数 32 ；③电网侧：电网线电压 690 V ，滤波电感 3.7 mH ；④直流侧：电容 $6800 \mu\text{F}$ ，直流侧设定电压 1100 V ，双向DC/DC变换器电感 0.6 mH ，滤波电容 $900 \mu\text{F}$ 。

当风速给定按正弦变化，电网的需求功率恒定为 0.3 MW 时，对系统进行了仿真。图7给出了系统仿真波形图，包括风速变化波形、发电机输出功率 P_s 、电网需求功率 P_g 及电池充放电功率 P_B 波形。

从图7中可以看出，当风速在变化时，电机输出功率随风速波动，直流侧钒电池能够快速进行充放

电，较好地平抑发电机输出功率波动。经过PI调节器产生导通占空比 D ，触发双向DC/DC变换器的开关器件，对电池进行充放电。当 $I_B > 0$ 时，电池进行充电； $I_B < 0$ 时，电池放电。储能电池的投入和投出一般要设置一定的滞环，以防止频繁的投入和投出^[15]，影响电池性能。当 U_{dc} 和 ΔP 在允许范围内波动时，储能电池不投入工作，此时 $D=0$ ；当 ΔP 超出设定值时，储能电池立刻投入工作。直流侧电压 U_{dc} 作为辅助条件判断，如果功率偏差对充电电流控制不够快，或者 U_{dc} 上升过快，导致 U_{dc} 超出限定值，此时令 $D=1$ ，使储能电池完全投入工作，直至直流侧电压降到一定值才切出。

3 储能型直驱永磁风电系统仿真

使用Matlab/simulink构建了直流侧加钒电池的直驱永磁风电系统的仿真模型，如图6所示。其中，钒电池（VRB）的等效电路模型参考文献[8-9]。

电，较好地平抑发电机输出功率波动。

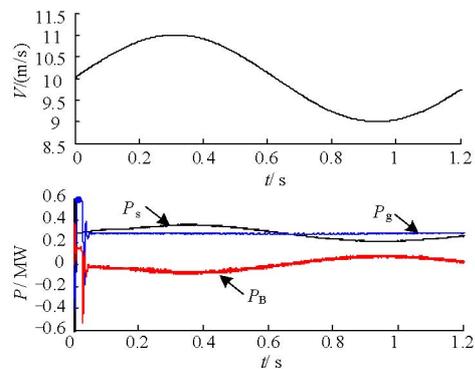


图7 风速波形及对输出功率平抑仿真波形图

Fig.7 Simulation waveforms of wind speed and output power smoothing

风速恒定为8.5 m/s, 电网需求功率在 $t=0.3$ s从0.28 MW变为0.45 MW时, 对系统进行了仿真。图8给出了系统仿真波形图, 包括发电机输出功率 P_s 、电网需求功率 P_g 及钒电池充放电功率 P_B 波形。

从图8可以看出, 当风速恒定, 电机输出功率恒定为0.33 MW时, 当电机输出功率大于电网需求功率时, 钒电池进行充电将多余的能量储存起来; 当电机输出功率小于电网需求功率时, 钒电池能够进行放电, 平衡电网需求功率, 动态响应速度快, 可以对电力实现调峰。

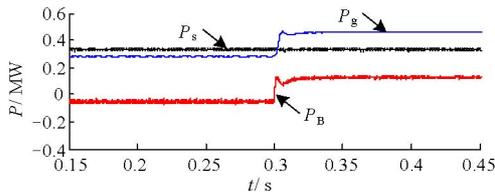


图8 电网需求功率从0.28 MW突变到0.45 MW时仿真波形图
Fig.8 Simulation waveforms of grid demand power changing from 0.28 MW to 0.45 MW

本文对在直流侧加钒电池储能装置的直驱永磁风电系统电压跌落特性进行了仿真。为简化仿真, 风速恒定为9 m/s, 电网侧变流器无功给定为0, 电压跌落的幅度为50%, 从0.2 s跌落开始, 到0.25 s跌落结束, 跌落持续时间为0.05 s, 仿真波形如图9所示, 包括电网侧变流器输出侧a相电流、输出有功功率、无功功率以及直流侧电压的波形。

当电网电压跌落时, 电机侧变流器不采取措施, 其正常运行。电网侧变流器由于采取限流措施, 导致输出功率受到限制, 将会造成直流侧功率不平衡, 电容两侧输入功率大于输出功率, 会导致直流侧电压上升。如果不采取应对措施, 会影响系统整体正常运行^[16-17]。当直流侧电压上升时, 网侧变流器直流电压外环首先起作用, 增大网侧变流器功率器件占空比, 输出电流在限流值以内, 此时不必投入储能装置; 当电流达到限流值以后, 直流侧电压外环饱和, 网侧变流器失去对直流侧电压控制作用, 此时必须投入储能装置, 使多余的能量流向双向DC/DC充电器给电池充电, 才能保证电网故障对系统运行基本上不产生影响。在电压跌落期间使系统仍能并网正常运行。

从图9中可以看出, 电压跌落期间网侧电流会增大, 但是不会超出变流器的限流值600 A; 发电机输出功率 P_s 不变, 可见电机侧变流器没有受到电压跌落的影响; 电压跌落的瞬间, 由于网侧电流不能突变, 因此网侧变流器输出有功功率 P_g 很快跌落至额定值的一半0.195 MW左右, 而随着电流的增

大, 有功功率 P_g 也增大, 跌落期间维持在0.3 MW左右, 当电压恢复时, 同样由于电流不能突变, 有功功率 P_g 瞬间达到0.47 MW左右。从波形上也可看出在电压恢复时有功出现一个尖峰, 经过短时的振荡后, 有功恢复至额定值; 输出无功功率 Q 基本上为0。从输出有功和无功波形可见系统仿真实现了有功和无功的解耦控制。直流侧电压波形与有功的波形相对应, 电压跌落时电容上输入功率瞬间增大, 因而电压出现上升, 但由于直流侧储能电池的作用, 直流电压上冲不会很大, 经过短时的调节后逐渐恢复至额定值, 直流侧多余的能量被电池吸收储存, 电池吸收的功率为 P_B , 对应电压恢复时电容上输出的功率瞬间增大, 因而电压出现下降, 此时 P_B 为正, 钒电池通过放电给电容充电。

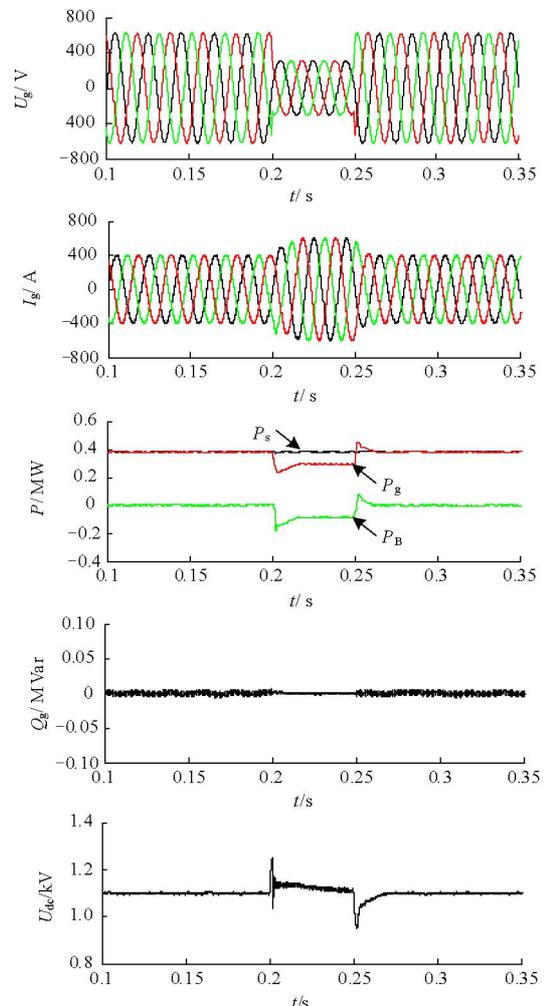


图9 电压跌落50%-0.05 s时仿真波形图
Fig.9 Simulation waveforms during voltage sag 50%-0.05 s

如果只是对网侧变流器限流, 而直流侧不加储能装置, 在电压跌落期间, 直流侧电压会上升较大, 实际中可能会超过直流侧电容的电压上限, 这对电

容器件也会造成损坏^[18]。可见,在直流侧加钒电池储能装置,有效地提高了直驱风力发电系统的低电压穿越能力,有较快的动态响应速度,同时实现了能量的回收再利用。

4 结论

利用钒电池巨大的储能优点,结合直驱永磁同步风力发电特点,建立了储能型直驱风力发电控制系统。在风速变化时,储能环节对发电机输出功率波动实现平抑;风速度不变时,储能环节能平衡电网需求功率;在电网电压跌落及恢复时,储能环节将使直驱风电系统仍保持并网正常运行,使发电机和电机侧变流器不受电压跌落的影响,有效提高了低电压穿越能力。储能型直驱风力发电控制系统改善了直驱风力发电系统并网运行的电能质量和稳定性,且动态响应快。

参考文献

- [1] 黄亚峰. 发电机输出功率波动平抑控制的可行性研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2007.
HUANG Ya-feng. Study on the feasibility of smoothing up wind power output fluctuation, Thesis[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2007.
- [2] Conroy J F, Watson R. Low-voltage ride-through of a full converter wind turbine with permanent magnet generator[J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1 (3): 182-189.
- [3] Morren J, de Hann S W H. Ride-through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20 (2): 435-441.
- [4] 胡书举, 李建林, 许洪华. 直驱风电系统变流器建模和跌落特性仿真[J]. 高电压技术, 2008, 34 (5): 949-954.
HU Shu-ju, LI Jian-lin, XU Hong-hua. Modeling on converters of direct-driven wind power system and its performance during voltage sags[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34 (5): 949-954.
- [5] Mullane A, Lightbody G, Yacamini R. Wind turbine fault ride-through enhancement[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20 (4): 1929-1937.
- [6] Morren J, Pierik J T G, de Haan S W H. Voltage dip ride-through control of direct-drive wind turbines[C]// Proceedings of the 39th International Universities Power Engineering Conference(UPEC). Bristol(UK): 2004.
- [7] 胡书举, 李建林, 许洪华. 直驱式VSCF风电系统直流侧Crowbar电路的仿真分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20 (3): 118-123.
HU Shu-ju, LI Jian-lin, XU Hong-hua. Simulation analysis of DC-link crowbar for direct-drive VSCF wind power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2008, 20 (3): 118-123.
- [8] Barote L, Weissbach R, Teodorescu R. Stand-alone wind system with vanadium redox battery energy storage[C]// Proceedings of IEEE, International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipments. Brasov(Romania): 407-412.
- [9] Chahwan J, Abbey C, Joos G. VRB modeling for the study of output terminal voltages, internal losses and performance[C]// Proceedings of IEEE Electrical Power Conference. Montreal(Canada): 387-392.
- [10] 葛善海, 衣宝廉, 张华民. 多硫化钠溴储能电池高效电极的研究[J]. 电源技术, 2003, 27 (5): 446-450.
GE Shan-hai, YI Bao-lian, ZHANG Hua-min. Studies on high efficient electrode for the sodium polysulfide bromine redox energy storage battery[J]. Power Source Technology, 2003, 27 (5): 446-450.
- [11] 姚骏, 廖勇, 瞿兴鸿, 等. 直驱永磁同步风力发电机的最佳风能跟踪控制[J]. 电网技术, 2008, 32 (10): 11-16.
YAO Jun, LIAO Yong, QU Xing-hong, et al. The optimum wind energy tracking for permanent magnet wind turbine generator[J]. Power System Technology, 2008, 32 (10): 11-16.
- [12] 吴迪, 张建文. 变速直驱永磁风力发电机控制系统的研究[J]. 大电机技术, 2006(6): 51-55.
WU Di, ZHANG Jian-wen. Control system of variable-speed permanent magnet generator directly driven by wind turbine[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2006(6): 51-55.
- [13] 张崇巍, 张兴. PWM整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
ZHANG Chong-wei, ZHANG Xing. PWM rectifier and control[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [14] Chinchilla M, Arnaltes S, Burgos J C. Control of permanent magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21 (1): 130-135.
- [15] 胡书举, 李建林, 许洪华, 等. 永磁直驱风电系统低电压运行特性的分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (17): 73-77.
HU Shu-ju, LI Jian-lin, XU Hong-hua, et al. Analysis on the low voltage ride-through capability of direct-drive permanent magnetic generator wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (17): 73-77.
- [16] 李建林, 胡书举, 许洪华, 等. 全功率变流器永磁直驱风电系统低电压穿越特性研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 19 (32): 92-95.

(下转第 78 页 continued on page 78)

- HAN Gu-jing, YIN Xiao-gong, LIN Tao. Design of medium voltage power-line high rate data communication terminal for power distribution automation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22 (3): 128-132, 158.
- [11] 谢志远, 耿烜, 侯思祖. 基于判决反馈的正交频分复用低压电力线通信信道估计的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (23): 66-70.
- XIE Zhi-yuan, GENG Xuan, HOU Si-zu. Channel estimation based on decision feedback for OFDM system in low-voltage power line communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (23): 66-70.
- [12] 程晓荣, 苑津莎, 侯思祖, 等. 基于移动代理的宽带电力线通信网络管理模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (9): 74-79.
- CHENG Xiao-rong, YUAN Jin-sha, HOU Si-zu, et al. Research of management model based on mobile agent for broadband power line communication[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (9): 74-79.
- [13] 舒悦, 陈启美, 李英敏. 跻身未来的电力线通信(七) PLC 组网方案及应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (12): 90-94.
- SHU Yue, CHEN Qi-mei, LI Ying-min. Predictive schemes for future power line communication(part seven) power line communication network forms and their application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (12): 90-94.
- [14] Gao Q Yu, Chong J Y, So P H J. Solutions for the "silent node" problem in an automatic meter reading system using power-line communications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23 (1): 150-156.
- [15] Heo Jongman, Lee Kamrok, Kang Hyoung Koo, et al. Adaptive channel state routing for home network systems using power line communications[J]. IEEE Transaction on Consumer Electronics, 2007, 53 (4): 1410-1418.
- [16] 戚佳金, 刘晓胜, 徐殿国, 等. 低压电力线通信分簇路由算法及网络重构[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (4): 65-71.
- QI Jia-jin, LIU Xiao-sheng, XU Dian-guo, et al. Cluster-based routing algorithm and reconstruction method of power line communication over lower-voltage distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (4): 65-71.
- [17] 刘晓胜, 戚佳金, 宋其涛, 等. 基于蚁群算法的低压配电网电力线通信组网方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (1): 71-76.
- LIU Xiao-sheng, QI Jia-jin, SONG Qi-tao, et al. Method of constructing power line communication networks over low-voltage distribution networks based on ant colony optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (1): 71-76.
- [18] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 二版. 北京: 科学技术出版社, 2005.

收稿日期: 2009-08-27; 修回日期: 2010-01-20

作者简介:

戚佳金(1979-), 男, 博士, 主要从事电力系统通信、电动汽车充电技术、变电设备状态检修技术、电力系统谐波分析等领域的研究工作; E-mail: Qijiajin@gmail.com

刘晓胜(1966-), 男, 博士生导师, 教授, 博士后, 研究方向为电力线载波通信、网络通信、智能控制等;

张良(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事电力线通信领域的研究工作。

(上接第 48 页 continued from page 48)

- LI Jian-lin, HU Shu-ju, XU Hong-hua, et al. Studies on the low voltage ride through capability of fully converted wind turbine with PMSG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 19 (32): 92-95.
- [17] Abbey C, Joos G. Effect of low voltage ride-through (LVRT) characteristic on voltage stability[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41 (3): 1-7.
- [18] Polisetty V K, Jetty S R, Vena G K. Intelligent integration of a wind farm to a utility power network with improved voltage stability[C].//Proceedings of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty First IAS Annual Meeting. Florida(USA): 2006: 1128-1133.
- 收稿日期: 2009-08-30; 修回日期: 2009-12-15
- 作者简介:
- 王文亮(1986-), 男, 博士研究生, 研究方向为风力发电控制技术; E-mail: 08121981@bjtu.edu.cn
- 葛宝明(1971-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机及其控制;
- 毕大强(1973-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统主设备继电保护、电力电子技术在电力系统中的应用。