

基于超级电容器储能的并网风电场 功率与电压调节技术

王振浩¹, 刘金龙¹, 李国庆¹, 辛业春¹, 杨琳¹, 于 娇²

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012;

2. 佳木斯电业局, 黑龙江 佳木斯 154002)

摘要: 利用新型储能器件超级电容器可短时快速大功率充放电的特性, 并结合四象限电压源型变流器有功功率和无功率解耦控制策略, 抑制风电场输出有功功率和无功率波动, 稳定风电场输出母线电压。将双向直流变换器作为超级电容器的电压适配器, 解决其端电压波动并维持放电时直流母线电压稳定。在电力系统仿真软件 DigSILENT/PowerFactory 中对采用超级电容器储能系统抑制风电场输出功率波动和提高电压稳定问题进行了仿真分析, 结果表明超级电容器储能系统达到了有效的运行特性。

关键词: 功率波动; 超级电容器; 解耦控制; 电压稳定; 有效运行

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)03-0113-04

0 引言

风电场的输出功率受随机变化的风速影响而波动, 这是限制风电场并网规模的主要因素^[1]。

克服风电场输出功率随机波动的有效途径是在风电场附近配套安装储能系统。例如, 在风电场附近建设抽水蓄能发电站, 与风电场联合运行, 可以平抑风电场输出功率的随机波动^[2-4]。但是, 由于受到选址条件的限制, 很难找到既适合建风电场, 又适合建抽水蓄能电站的厂址。利用新型储能元件高功率密度的超级电容器可短时大功率充放电的特性^[5-8], 为平抑风电场输出功率和电压波动提供了有效方式, 而且国外超级电容器在电力系统中的应用实例, 也充分证明了超级电容器储能在平抑功率波动、改善供电质量等方面的独特优势^[9-13], 因此超级电容器是风电场配置储能系统的首选。

本文介绍了一种基于超级电容器储能的并网风电场功率与电压调节系统, 根据实际风电场和风电机组的运行特点分析并确定了储能系统的具体控制策略。仿真结果验证了该储能系统能够较好地平抑风电场有功功率波动, 并通过对无功功率波动的抑制稳定了风电场输出母线电压。

1 超级电容器储能系统的工作原理

本文采用的超级电容器为双电层电容器 EDLC (Electric Double Layer Capacitor)。由于 EDLC 内部结构复杂, 动态特性很难描述, 目前的模型都有局限性, 一般根据储能应用场合的不同选择有针对性的

模型。考虑超级电容充放电时的动态特性, 主要表征自放电现象的并联等效电阻可予以忽略^[14], 因此可得超级电容器简化等效模型如图 1 所示。



图 1 超级电容器简化等效电路

Fig.1 Simplified equivalent circuit of EDLC

图 2 为超级电容器储能系统 EESS (EDLC Energy Storage System) 经电抗器及变压器连接到并网风电场输出母线位置的结构示意图, 储能系统电路主要由 3 个部分构成, 即超级电容器组、双向直流变换器、电压源型变流器 VSR (Voltage Source Rectifier)。直流侧采用电容器为逆变器提供电压支撑并缓冲各个桥臂关断时的冲击电流, 减小直流侧谐波。超级电容器组作为终端储能元件, 并加入双向直流变换器解决超级电容器端电压波动问题, 为直流母线提供平稳电压, 从而使得 VSR 可工作在持续稳定状态。

总体工作方案是: 当风电场发电充足时, 储能系统工作于充电状态, 将过剩的电能储存。当风电场发电不足缺额时, 储能系统工作于放电状态, 补偿缺额的电能, 从而维持并网。具体通过 PWM 四象限 VSR

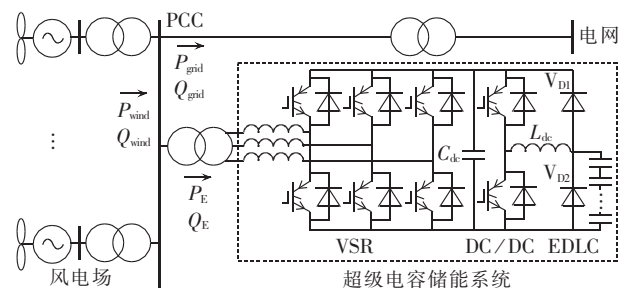


图 2 超级电容器储能系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of EESS

收稿日期: 2010-04-06; 修回日期: 2010-11-11

基金项目: 国家电网公司科技项目

Project supported by the State Grid Corporation of China

的有功、无功功率解耦控制可以对有功、无功的缺额分别进行补偿。当监测电路监测到风场输出有功波动时,采用 PWM 控制 VSR 和双向直流变换器调节储能系统短时快速吞吐输出母线上的有功波动。当监测到风场输出无功波动导致风电场输出母线电压不稳定时,通过控制超级电容器快速充放电平滑风电场无功功率输出从而维持输出母线电压稳定,达到维持风电场与系统的并网稳定运行。

2 EESS 的控制策略

储能设备的控制系统主要是 VSR 和双向直流变换器的控制部分。VSR 的控制实际上是对交流侧电流的控制,通过控制三相 VSR 输入电感上电流的幅值和相位,控制整流器交流侧与直流侧之间的有功功率和无功功率的交换实现功率的四象限控制。因为超级电容器在充放电过程中其端电压随其能量的变化而波动,所以加入双向直流变换器作为超级电容器的稳压器。

2.1 VSR 控制

VSR 的控制框图如图 3 所示。通过对交流侧电流的有功分量和无功分量的解耦控制来实现有功功率与无功功率的分别控制。采用电流闭环矢量控制,将检测到的三相输入电流经三相静止坐标到两相旋转坐标变换,得到电流的有功分量 I_d 和无功分量 I_q 。外环为直流电压环, U_d^* 为直流电压的给定值, U_d 为实际的直流输出电压,其输出 I_d^* 为交流侧电流的有功分量给定值,与 φ (交流电源电压与电流之间的相位差)的正切量相乘可得无功分量 I_q^* ,经过运算得到 PWM 整流器的交流侧电压的给定值 U_{pd}^* 、 U_{pq}^* 的 2 个分量。然后经两相旋转坐标到三相静止坐标变换得三相交流侧调制电压给定值 U_a^* 、 U_b^* 、 U_c^* ,最后经 PWM 调制电路得到三相整流器的驱动信号。本控制方法中提高了电流控制精度,稳态情况下能够准确地跟踪电流指令变化,实现无静差,并且动态性能也较好。

2.2 双向直流变换器控制

双向直流变换器是直流母线和超级电容器之间

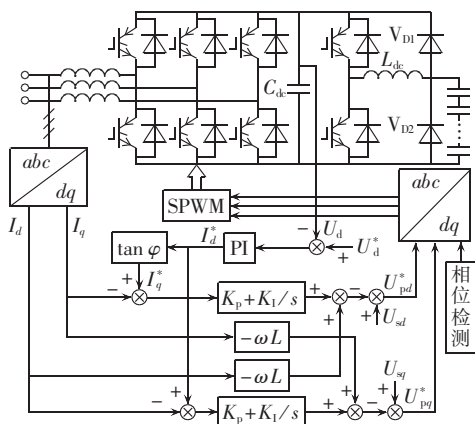


图 3 VSR 的控制框图

Fig.3 Block diagram of VSR control

的一个开关控制装置,它作为超级电容器的电压适配器起稳定电压的目的。图 4 为双向直流变换器电路图, V_{T1} 和 V_{T2} 为变换器的主要开关器件 IGBT,当超级电容充电时,通过 V_{T1} 构成的降压斩波电路完成。当超级电容器放电时,通过 V_{T2} 构成的升压斩波电路将超级电容器端电压升至需要的直流母线电压,并保持规定的电压值附近。二极管 V_{D1} 和 V_{D2} 用来保护超级电容器防止反向充电。 R_E 很小,可以忽略。从而可得双向直流变换器输入电压 U_d 与输出超级电容器电压 U_c 之间的关系为

$$U_d = \frac{D}{1-D} U_c \quad (1)$$

其中, D 为双向直流变换器的占空比。随着超级电容器端电压的不断变化,实时调节开关管的占空比,使得输出的直流电压保持稳定。

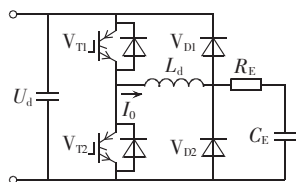


图 4 双向直流变换器结构

Fig.4 Structure of bi-directional DC/DC converter

超级电容器组的充电电压参考值 U_{ref} 由式(2)

确定:

$$U_{ref} = (U_{max} - U_{min}) / 2 \quad (2)$$

其中, U_{max} 、 U_{min} 分别指超级电容器组的最大、最小充电电压值。

本系统对超级电容器充放电采取了恒流控制方式,为了使充放电过程中电流恒定,对双向直流变换器采取了电流闭环控制,图 5 为其控制框图。

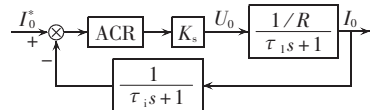


图 5 双向直流变换器控制框图

Fig.5 Block diagram of bi-directional DC/DC converter control

3 系统仿真研究

图 6 为吉林省某实际风电场各台机组所处的空间分布风速变化示意图 (Matlab 环境下, l_1 指东西坐标, l_2 指南北坐标), 可以明显看出风电场的各台机组之间的风速存在差异。所以考虑取此风电场等值平均风速作为仿真用的风速曲线如图 7 所示。利用电力系统分析软件 DigSILENT/PowerFactory 中的标准风机模型,按照某实际含 32 台容量为 850 kW 风电机组的风电场为例进行仿真分析。仿真参数(未标明单位的参数为标么值)中发电机额定功率 850 kW, 额定电压 690 V, $R_s = 0.0104$, $X_s = 0.0172$, $X_m = 7.8$, $R_r = 0.13$, $X_r = 0.132$; 风力机 $H_t = 2.5$ s, $H_g = 0.5$ s, $K =$

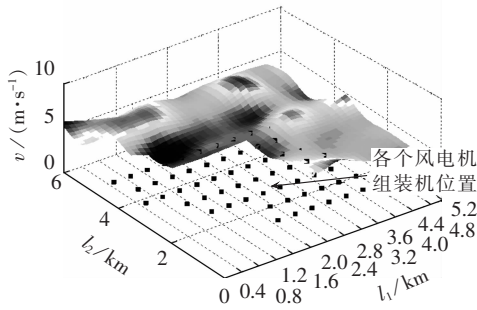


图 6 某时刻风速空间分布示意图

Fig.6 Spatial distribution of wind speed

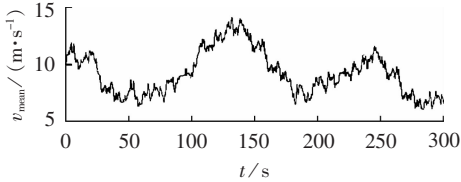


图 7 模拟仿真用的风场等值平均风速曲线

Fig.7 Mean wind speed curve used in simulation

113, $D=0$;机端变压器 $S=2.7 \text{ MV}\cdot\text{A}$, $X_t=0.045$;出口变压器 $S=80 \text{ MV}\cdot\text{A}$; $X_t=0.1$;每台风电机组所需补偿电容的无功容量为 245 kvar。根据计算,超级电容器参数选择北京某高功率型产品数据,容量 3000 F,额定电压 2.7 V,串联等效电阻为 0.045 mΩ,400 串 20 并组成超级电容器组,最大存储能量 108 MJ,额定工作电压 1.2 kV。

未安装超级电容器储能设备前风电场输出母线有功功率和无功率曲线如图 8 所示,有功功率最大功率变化量超出了国家电网公司规定的推荐值标准^[16],无功功率波动也较明显。在此状况下风电场输出母线公共连接点(PCC)电压出现波动如图 9 所示(图中电压取标么值)。

通过安装超级电容器储能系统进行快速功率调节后,风电场送入系统的有功功率和无功率变化如图 10 所示,有功功率的最大波动量被限制在了 3 MW 以内,达到了国网公司的标准要求。同时也使

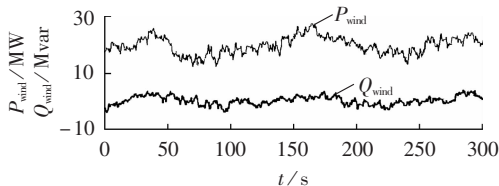


图 8 未安装储能设备时输出有功、无功功率曲线

Fig.8 Output power curves of wind farm without EESS

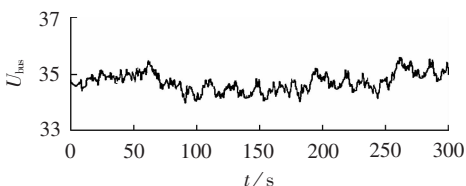


图 9 未安装储能设备时输出母线电压

Fig.9 Output bus voltage curve of wind farm without EESS

得送入电网的无功功率波动明显降低。通过抑制无功的波动达到了抑制母线电压波动的效果,如图 11 所示。

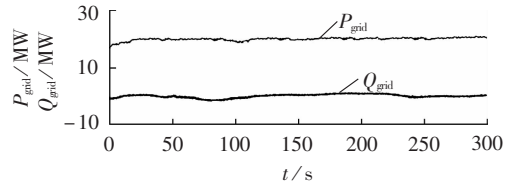


图 10 储能调节后注入系统的有功、无功功率曲线

Fig.10 Output power curves of wind farm with EESS

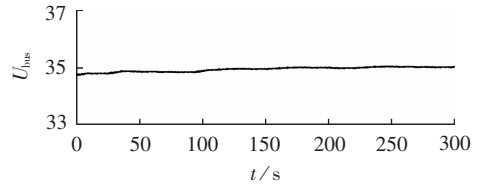


图 11 储能调节后输出母线电压

Fig.11 Output bus voltage curve of wind farm with EESS

4 结论

采用新型储能器件超级电容器可实现大功率短时充放电的特性来解决并网风电场输出功率波动对电网的影响。通过建立对电压源型变流器和双向直流变换器有效的控制策略,并结合某实际并网风电场的算例仿真分析和研究。结果表明:采用超级电容器储能可实现短时内快速对风电场输出功率波动的抑制,使并网风电场输出功率的最大功率变化率被限制在国家电网公司规定的推荐值之内。通过对风电场输出无功功率波动的抑制实现了对输出母线电压波动的有效抑制作用。

参考文献:

- [1] 孙涛,王伟胜,戴慧珠,等. 风力发电引起的电压波动和闪变[J]. 电网技术,2003,27(12):62-66.
SUN Tao,WANG Weisheng,DAI Huizhu,et al. Voltage fluctuation and flicker caused by wind power generation[J]. Power System Technology,2003,27(12):62-66.
- [2] BARTON J P,INFIELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2004,19(12):441-448.
- [3] YANG Z,SHEN C,ZHANG L,et al. Integration of a statcom and battery energy storage[J]. IEEE Transaction on Power Systems,2001,16(2):254-260.
- [4] BLACK M,STRBAC G. Value of bulk energy storage for managing wind power fluctuations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2007,22(1):197-205.
- [5] LI W,JOOS G,ABBEY C. Wind power impact on system frequency deviation and an ESS based power filter algorithm solution[C]//Proceedings of IEEE PES Power System Conference and Exposition. Atlanta,GA,USA:IEEE,2006:2077-2084.
- [6] ABBEY C,STRUNZ K,JOOS G. A knowledge-based approach for control of two-level energy storage for wind energy systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2009,24(2):539-547.

- [7] CARDENAS R,PENA R,ASHER G.,et al. Power smoothing in wind generation systems using a sensorless vector controlled induction machine driving a flywheel[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2004,19(1):206-216.
- [8] CHONG H,HUANG A Q,BARAN M E,et al. Statcom impact study on the integration of a large wind farm into a weak loop power system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2008,23(1):226-233.
- [9] USHIWATA K,SHISHIDO S,TAKAKASHI R,et al. Smoothing control of wind generator output fluctuation by using electric double layer capacitor [C]//Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems. Seoul,Korea:[s.n.],2007:308-313.
- [10] ABBEY C,JOOS G. Supercapacitor energy storage for wind energy applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2007,43(3):769-776.
- [11] MUYEEN S M,ALI M H,TAKHASHI R,et al. Wind generator output power smoothing and terminal voltage regulation by using STATCOM / ESS[C]//Proceeding of IEEE Power Technology Conference. Lausanne,Switzerland,IEEE,2007:1232-1237.
- [12] UMMELSL B C,PELGRUM E,KLING W L. Integration of large scale wind power and use of energy storage in the Netherlands' electricity supply[J]. IET Renewable Power Generation,2008,2(1):34-46.
- [13] KINJO T,SENJYU T,URASAKI N,et al. Output leveling of renewable energy by electric double-layer capacitor applied for energy storage system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2006,21(1):221-227.
- [14] 王振浩,张延奇,李国庆,等. 基于超级电容器的直流系统混合储能研究[J]. 电网技术,2010,34(4):158-162.
WANG Zhenhao,ZHANG Yanqi,LI Guoqing,et al. Research on hybrid energy storage for DC system of substation and power plants based on super capacitors[J]. Power System Technology,2010,34(4):158-162.

(编辑: 康鲁豫)

作者简介:

王振浩(1964-),男,山东潍坊人,教授级高级工程师,长期从事电力系统自动化科技研发及教学工作(**E-mail**:keyan618@126.com);

刘金龙(1983-),男,黑龙江牡丹江人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统安全稳定与控制(**E-mail**:jinlongflying@126.com);

李国庆(1963-),男,吉林长春人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统安全稳定与控制。

Power and voltage regulation of wind farm based on EDLC energy storage

WANG Zhenhao¹,LIU Jinlong¹,LI Guoqing¹,XIN Yechun¹,YANG Lin¹,YU Qiao²

(1. Northeast Dianli University,Jilin 132012,China;

2. Jiamusi Power Supply Bureau,Jiamusi 154002,China)

Abstract: As the new energy storage device EDLC(Electric Double Layer Capacitor) can be quickly and completely charged and discharged with large power,it is used,combined with the active and reactive power decoupling control strategy of four-quadrant voltage source rectifier,to suppress the output power fluctuation of wind farm and stabilize its output bus voltage. Bi-directional DC-DC converter is used as the voltage adapter of EDLC to suppress its terminal voltage fluctuation and maintain the voltage stability of DC bus. The effective operation of the proposed EDLC energy storage system is verified by the simulation with DigSILENT / PowerFactory.

Key words: power fluctuation; EDLC; decoupling control; voltage stability; effective operation