

模块化多电平储能单元改善并网风电场稳定性研究

张振华¹, 冯涛²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 成都电业局, 四川 成都 610021)

摘要: 由于风能的随机性, 风电场存在输出功率和连接点电压波动的问题, 为提高风电并网稳定性, 提出一种基于模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC)拓扑和超级电容结合的储能单元结构。利用拟合函数建立风机数学模型, 分析了基于异步发电机风电系统的运行特性; 利用逆系统方法将 MMC 变流器等效电路模型进行线性解耦, 对于解耦后子系统设计了以平滑有功功率和稳定接入点电压为目标的控制器。在 Matlab/Simulink 中搭建了在随机风波动时的仿真模型。仿真结果表明, 基于 MMC 和超级电容的储能单元具有快速的有功和无功补偿能力, 电网吸收的有功功率维持恒定, 接入点电压稳定在额定值, 从而降低了风速变化对电网的冲击, 提高了风电并网的稳定性。

关键词: 风力发电; 模块化多电平变流器; 超级电容; 储能单元; 逆系统方法

Abstract: The randomness of wind energy leads to the problem of fluctuation for both wind power and voltage. In order to enhance the stability of a grid-connected wind farm, a kind of energy storage unit based on modular multilevel converter (MMC) and super capacitor is presented. After establishing the mathematical model of wind turbine, the operation characteristics of wind power based on induction generator are analyzed. Inverse system method is developed to decouple the modular multilevel converter model and design the controllers for smoothing the output active power and stabilizing the voltage of the connected point. A simulation model is established with Matlab/Simulink. The simulation results show that the energy storage unit can rapidly compensate active power and reactive power of wind power. The power absorbed by the grid maintains constant and the voltage is kept at the setting value, which greatly enhances the power quality and the stability of wind power grid integration.

Key words: wind power; modular multilevel converter; super capacitor; energy storage unit; inverse system method

中图分类号: TK83 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)01-0006-03

0 引言

随着风电的大规模发展, 其在电网中所占比重越来越大。由于风具有间歇性, 风电机组输出稳定性差, 影响电网电能质量, 甚至可能危及电网的稳定运行, 因此需研究风电运行特点并提高并网运行的稳定性。常见的解决方法是利用储能装置来抑制功率的波动^[1-5]。超级电容由于具有大功率密度、材料无污染和循环使用等优点, 成为了一种较理想的储能载体, 得到广泛研究^[6-8]。选择超级电容作为储能元件, 将其和模块化多电平变流器相结合, 作为功率调节单元, 对风电机组进行功率补偿。选择模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC), 是由于它模块化的设计能灵活地适应各种电压等级和容量要求, 同时输出多电平能有效改善电压波形, 降低谐波污染^[9]。

在给出储能单元结构和风机模型后, 在对变流器

进行功率解耦的基础上, 设计抑制风电输出功率波动和连接点电压波动的控制策略, 仿真结果证明了该策略的有效性。

1 基于 MMC 储能单元的并网风电系统

储能单元与风电结合的系统如图 1 所示。

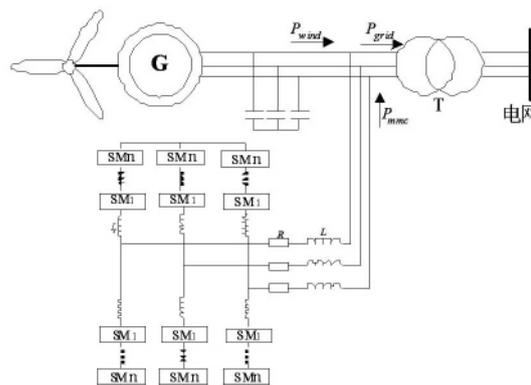


图 1 储能单元连接风电系统

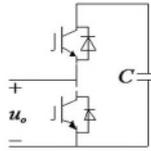


图2 子模块

图1中风电机组采用异步发电机组,并联电容器组是为异步电机的启动和运行提供一定的无功支撑。基于MMC和超级电容的储能单元并联接入低压母线侧。 P_{wind} 为风电系统输出功率, P_{mmc} 为储能单元输出功率, P_{grid} 为电网吸收的功率。

对于风机,当设定 V 为风速, R 为风轮半径, ρ 为空气密度, β 为桨距角, ω 为风轮转速时,其模型按照式(1)建立^[7]。

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p V^3 \quad (1)$$

$$C_p = 0.22(116/\alpha - 0.4\beta - 5) \exp(-12.5/\alpha) \quad (2)$$

$$\alpha = 1/(1/(\lambda + 0.08\beta) - 0.035/(\beta^3 + 1)) \quad (3)$$

其中,叶尖速比 $\lambda = \omega R/V$;功率系数 C_p 是反映风力机效率的重要参数,它是叶尖速比 λ 和桨距角 β 的非线性函数,拟合函数为式(2)、(3)所示,这里采用定桨距角风力机(β 一定)。

MMC每相有上下两个桥臂,每个桥臂由多子模块级联而成。每个子模块由两个开关器件和一个电容组成,如图2所示,由于需要储能,子模块中的电容选择为超级电容。MMC每时刻每相上下同时投入模块数目之和相同,电抗 L_s 是为了抑制相间环流。MMC储能单元的功率调节作用是通过每个子模块中超级电容的充放电来完成的。当风速高的时候,对超级电容充电,将一部分能量储存在MMC储能单元中;当风速低的时候,MMC储能单元通过电容放电,释放能量,从而保证风电送入电网的功率平滑。在实际运行时,超级电容是在满足耐压时在一定范围进行充放电,既保证有功功率吞吐的能力,又能保证超级电容的安全长期运行。

2 储能单元的控制策略

储能单元能量存储在级联子模块的超级电容中,需要通过MMC变流器来进行吸收和释放这种转换,故需研究MMC变流器的模型。当取母线电压矢量为参考矢量,且 d 轴与它始终重合时,在图1所示参考方向时,得到 dq 旋转坐标系下数学模型。

$$\begin{cases} u_d - e_d = (Lp + R) i_d - \omega L i_q \\ u_q - e_q = \omega L i_d + (Lp + R) i_q \end{cases} \quad (4)$$

式中 u_d, u_q 为MMC逆变电压的 dq 分量; e_d, e_q 为电网电压的 dq 分量; i_d, i_q 为储能单元注入并联节点电流的 dq 分量; p 为微分算子。

电抗 L 是MMC储能单元和电网交换能量的纽带,也起到滤波的作用,但同时造成了功率的耦合。为保证储能单元能够快速调节功率,利用逆系统方法,对上述系统进行解耦^[10,11]。为便于描述,将上式写成状态变量表达式。

$$\begin{cases} u_1 - e_d = (Lp + R) x_1 - \omega L x_2 \\ u_2 - e_q = \omega L x_1 + (Lp + R) x_2 \end{cases} \quad (5)$$

其中,取 $[x_1, x_2] = [i_d, i_q]$, $[u_1, u_2] = [u_d, u_q]$, $[y_1, y_2] = [i_d, i_q]$ 。

式(5)表征的是一个非线性的受控对象,可以构造该对象的逆系统,通过与原系统串联将其改造为具有线性传递关系的伪线性系统,从而利用线性系统原理设计控制器。先对输出变量求取一阶导数得

$$\begin{cases} py_1 = px_1 = (u_1 - Rx_1 + \omega Lx_2 - e_d) / L \\ py_2 = px_2 = (u_2 - \omega Lx_1 - Rx_2 - e_q) / L \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中已经显含输入变量,故不需要进一步对输出变量求导,可解得逆系统模型。

$$\begin{cases} u_1 = Lpy_1 + Rx_1 - \omega Lx_2 + e_d \\ u_2 = Lpy_2 + \omega Lx_1 + Rx_2 + e_q \end{cases} \quad (7)$$

对于式(7)逆系统,设定其输入变量 $[v_1, v_2] = [py_1, py_2]$,输出变量为 $[u_1, u_2]$ 。这样将式(7)逆系统和式(5)原系统串联,两者构成如图3所示的伪线性复合系统,使得原来耦合的系统等价于两个一阶积分的线性子系统,如图4所示。

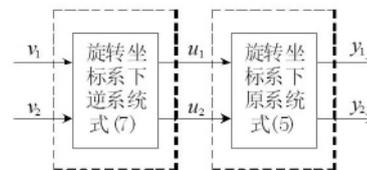


图3 逆系统与原系统串联

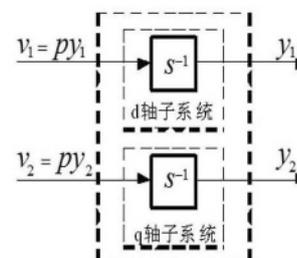


图4 解耦系统

为对图4伪线性系统设计控制器,先对储能单元的控制目标进行研究。对于异步电机而言,其输出有功和吸收的无功随风速的大小波动,而无功的波动又会导致节点电压的波动,为保证风电系统输出的稳定性,储能单元需同时具有有功和无功功率的补偿能力。考虑到实际风电场风机的分散性,为便于集中控制,储能单元并联于风电场出口侧低压母线,故设定储能单元的调节目标是平滑电网吸收的有功功率和稳定风电低压母线的节点电压。图5所示为系统的控制框图。外环控制结构如图5所示,其中 V_{mref} 为电网额定相电压的幅值,它与节点电压的实际幅值作差,通过PI控制器得到内环无功电流的指令值 i_{qref} ; P_{ref} 为电网吸收有功的指令值,一般选取为一定时间内预测风速的平均值对应的风电有功出力,它与 P_{grid} 作差并通过PI控制器得到内环有功电流指令值 I_{dref} ,而为提高有功控制的响应速度,在其中叠加了前馈控制环节得到的有功电流预估值。在得到 i_{dref} 、 i_{qref} 后,对于MMC变流器而言,其控制目标是要实现上述补偿电流指令值的快速跟踪,以完成有功和无功功率的补偿,故逆系统的输入变量 v_1 、 v_2 应为指令值和实际值的误差,即 $i_{dref} - i_d$ 、 $i_{qref} - i_q$,同时为确保消除误差,引入PI控制器,故最终控制结构如图5。

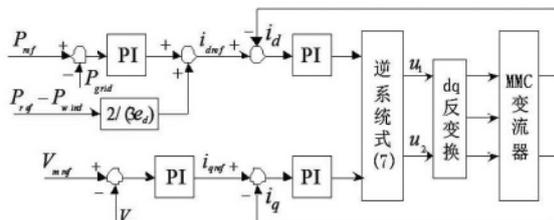


图5 整体控制框图

对于MMC变流器,要求正常工作时各子模块电容电压能均衡,这里利用文献[12]的调制策略和文献[9]的均压策略。

3 算例仿真

在Matlab/Simulink中搭建仿真模型。对于风电机组,采用电容器组对其按有功功率的15%进行无功补偿。风电场采用定桨距恒速风力发电机组,将风电场内机组等值为一台额定输出功率10MW的风电机组,输出电压为3.3kV/50Hz。然后通过升压变压器经线路接入35kV电网。对于MMC储能单元,设定每相有40个子模块,即每个桥臂有20个,每个子模块中电容可由超级电容组构成,等效电容值为2F,耐压为500V,设定其初始电压为350V,工作电压

范围为300~450V。限流电抗 $L_s = 4\text{ mH}$,连接电抗 $L_s = 5.5\text{ mH}$,等效电阻 $R = 0.25\ \Omega$ 。

仿真中取一定时间内风速信号的平均值作为风速预测值来确定储能单元有功功率的指令值,图6为5s内风速变化情况,图7为风电场输出有功功率和电网吸收有功功率的对比,图8为加入储能单元后风电并网接入点电压波形的标么值,图9为MMC储能单元子模块电容电压。

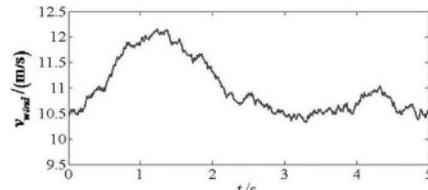


图6 短时间内风速变化情况

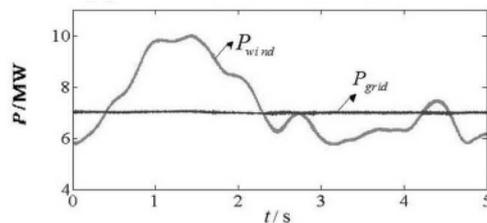


图7 储能单元对风电出力的平滑效果对比

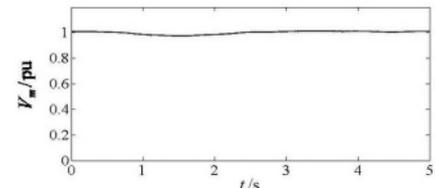


图8 公共连接点的电压标么值

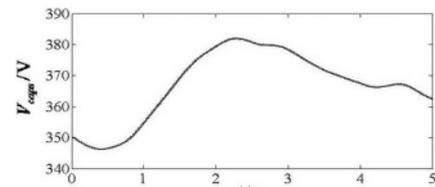


图9 储能单元子模块的电容电压

从储能单元并接入风电后仿真波形看出,当风速变化时,风电机组输出的有功功率也会跟随风速波动,但由于系统惯性的影响,有功功率的变化稍滞后于风速的变化;同时由风机模型知有功功率与风速的三次方成正比,当风速在不大的范围变化时,有功功率的波动会较大,图示在6MW到10MW之间,而这时根据预测风速平均值设定的有功功率指令值为7MW,故要求储能单元具有足够的功率吞吐容量;而风速波动的随机性要求储能单元能够快速地进行有功调节。图示电网吸收有功功率能稳定在设定值7MW,表明储能单元具有快速平滑风电输出的能力。在储

(下转第53页)

4 结 论

介绍了东西关电厂黑启动方案的理论依据和实施过程,并且分析了不同类型的水电机组作为黑启动电源的优劣,为运行人员选择黑启动电源提供了理论依据。运用PSCAD对黑启动过程中的发电机带空载长线的过电压进行了仿真,仿真验证了黑启动方案的可行性。最后通过黑启动试验的成功,说明东西关电厂可以作为南充遂宁电网的黑启动电源点。

参考文献

[1] 熊惠敏,房鑫炎,郁惟慵,等. 电力系统全网停电后的恢复——黑启动综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(3): 12-17.

[2] 陈湘君. 广州蓄能水电厂作为广东电网黑启动电源的可行性方案[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(13): 42-44.

[3] 鲁丽娟. 实现电力系统黑启动的基本条件[J]. 电力安

(上接第8页)

能单元调节有功功率时,各子模块超级电容电压在充放电过程中也能保持均衡。图示风电接入点电压标么值能稳定在1附近,说明储能单元也具有快速的无功补偿能力,能满足有功功率波动时对无功功率的需求。储能单元可以实现有功和无功的快速综合补偿,从而大大降低风速波动对电网稳定性的冲击,也有利于风电机组自身的平稳运行。

4 结 论

对于采用异步电机的风电系统,在风速变化时,其输出有功功率会波动,导致吸收的无功功率发生变化,连接点的电压也随之改变,故储能单元需要具有有功和无功的综合补偿能力。超级电容具有大功率密度,能够循环使用,故成为一种合适的储能载体,而MMC作为一种模块化级联拓扑,其多电平电压输出不会对电网电能质量造成影响,将两者结合作为储能单元,仿真表明,其对风电系统具有灵活快速的功率调节能力,能平滑风电机组有功输出,稳定接入点交流电压,较大幅度提高了风电场并网运行稳定性。

参考文献

[1] 王文亮,葛宝明,毕大强. 储能型直驱永磁同步风力发电控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 43-48, 78.

[2] 李国杰,唐志伟,聂宏展,等. 钒液流储能电池建模及其平抑风电波动研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 115-119, 125.

全技术, 2009, 11(12): 54-58.

[4] 李苏宁. 黑启动试验时发电机组运行方式的配置[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(18): 104-107.

[5] 于永海,许健. 水电站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.

[6] 程刚. 葛洲坝二江电厂机组黑启动实践与分析[J]. 中国电力, 2002, 35(11): 42-46.

[7] 沙锡林,陈新方,游赞培,等. 贯流式水电站[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

[8] T. Nagata, H. Sasaki. A Multi-Agent Approach to Power System Restoration[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2002, 2(17): 457-462.

[9] C. Y. Teo, W. Shen. Development of an Interactive Rule-Based System for Bulk Power System Restoration[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2000, 2(15): 646-653.

[10] S. Lee, S. Lim and B. Ahn. Service Restoration of Primary Distribution Systems Based on Fuzzy Evaluation of Multi-criteria[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 1998, 3(13): 1156-1163.

(收稿日期:2011-09-15)

[3] 张占奎,王德意,迟永宁,等. 超导储能装置提高风电场暂态稳定性的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 38-42, 47.

[4] 阮军鹏,张建成,汪娟华. 飞轮储能系统改善并网风电场稳定性的研究[J]. 电力科学与工程, 2008, 24(3): 5-8.

[5] 张步涵,曾杰,毛承雄,等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 54-58.

[6] Laxman Maharjan, Shigenori Inoue, Hirofumi Akagi. A Transformerless Energy Storage System Based on a Cascade Multilevel PWM Converter with Star Configuration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(5): 1621-1630.

[7] 郭学英,金晓林. 基于超级电容器的风电系统低电压穿越特性研究[J]. 电工电气, 2010(10): 1-5.

[8] 侯世英,房勇,曾建兴,等. 应用超级电容提高风电系统低电压穿越能力[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(5): 26-31.

[9] 刘钟淇,宋强,刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 53-58.

[10] 刘陆洲,肖建,王嵩. 感应电机的新型神经网络广义逆系统解耦控制[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(z1): 72-77.

[11] 黄崇鑫,王奔,邹超,等. 并联有源电力滤波器新型控制策略仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 52-55, 70.

[12] 屠卿瑞,徐政,姚为正. 模块化多电平换流器型直流输电电平数选择研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 33-38, 44.

(收稿日期:2011-09-30)