

# 超导储能装置应用于风电场平滑功率输出的研究

闫广新<sup>1</sup>, 王 凯<sup>2</sup>

(1. 新疆电力设计院, 新疆 乌鲁木齐 830001;

2. 新疆风电工程设计咨询有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830063)

**摘要:**建立了风电机组和超导储能(superconducting magnetic energy storage, SMES)装置的数学模型以研究 SMES 对并网风电场运行稳定性的改善。针对风电系统中经常出现的联络线短路故障和风电场的风速扰动,提出利用 SMES 安装点的电压偏差作为 SMES 有功控制器的控制信号的策略。并搭建了风电场接入电网后的仿真模型,对实例系统进行的仿真计算结果表明,SMES 采用该控制策略,不仅可以在网络故障后有效地提高风电场的稳定性,而且能够在快速的风速扰动下平滑风电场的功率输出,降低风电场对电网的冲击。

**关键词:** 风力发电系统; 电力系统稳定; 超导储能(SMES)

**Abstract:** The mathematic models for wind power generator and superconducting magnetic energy storage (SMES) unit are set up, and the function of SMES in improving the operation performance of wind farms is then studied. According to the short-circuit fault in the grid and wind disturbance of the wind farms often occurred, a new strategy using voltage deviation of SMES connection point as control signal of the active power controller of SMES unit is presented. A simulation model of the power system connected with wind farm is established. The simulation results show that with the designed controller, SMES can not only improve the transient stability of wind power system after the short circuit of the grid, but also effectively smooth the output of wind farm and reduce the impulsion to power system during the fast wind disturbance.

**Key words:** wind power system; power system stability; superconducting magnetic energy storage (SMES)

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)01-0076-05

## 0 引言

开发利用新能源和可再生能源是解决中国能源和环境问题的重要措施之一,风电是可再生能源的重要组成部分。风力发电作为目前世界上可再生能源开发利用中技术最成熟、最具规模开发和商业化发展前景的发电方式之一,由于其在减轻环境污染、调整能源结构、解决偏远地区居民用电问题等方面的突出作用,越来越受到世界各国的重视并得到了广泛的开发和利用<sup>[1]</sup>。目前,在中国越来越多的大中型风电场相继建成并投入运行。截止 2012 年年底,全国风电并网总量达到 60 830 MW,发电量达到 100 400 GWh,风电已超过核电成为继煤电和水电之后的第 3 大主力电源。由于自然风资源不稳定的特点,风电功率的波动性和间歇性会对局部电网电压的稳定性和电能质量产生影响。另外,众多大型风电场多位于电网结构薄弱环节,需通过一定的措施改善风电场的运行性能。为了更加充分地利用可

开发的风能资源,提高风力发电的比例,除了合理地进行规划设计外,有必要探讨改善风电场运行性能的有效措施,降低风电对电网的影响。

超导磁储能(superconducting magnetic energy storage, SMES)具备快速的功率吞吐和灵活的四象限调节能力,在维持电网稳定、提高输电能力和改善电能质量方面发挥了极其重要的作用。将超导磁储能用于风力发电系统,是一种理想的提高风电系统动态性能和解决系统稳定性的手段。

下面建立了风电机组、风电场和 SMES 数学模型,并针对某风电场通过 MATLAB/Simulink 进行了仿真,研究 SMES 对并网风电场运行稳定性的改善,对实例系统的仿真研究表明,SMES 在改善风电场稳定性方面具有优良的性能。

## 1 风电机组的模型

根据风力发电系统的特性,风电机组数学模型主要环节包括:风能的吸收和转换装置——风机;起

连接作用的中间环节——轮毂、齿轮箱、联轴器;机械能到电能的转换装置——发电机,如图1所示,图中  $E$  为异步发电机的内电势,  $\omega$  为转子转速<sup>[1]</sup>。

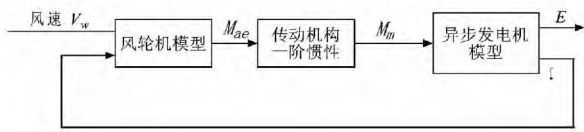


图1 简化风电机组模型框图

各部分数学模型如下。

(1) 风轮机模型

$$M_m = 0.5\pi\rho C_p \frac{V_w^2 R^3 \Omega_N}{\lambda P_N} \times 10^{-3} \quad (1)$$

其中,  $M_m$  为风机叶片产生的转矩;  $\rho$  为空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $V_w$  为作用于风轮机的风速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $R$  为风轮机半径,  $\text{m}$ ;  $\lambda$  是叶尖速比;  $C_p$  为风能利用系数(即在单位时间内风轮所吸收的风能与通过风轮旋转面的全部风能之比);  $\Omega_N$  是风轮机的额定机械角速度,  $\text{Rad}/\text{s}$ ;  $P_N$  是风轮机额定功率,  $\text{MW}$ <sup>[2]</sup>。

(2) 传动机构模型

忽略损耗和传动轴的柔性,传动部分可用一阶惯性环节模拟为

$$\frac{dM_T}{dt} = \frac{1}{T_h} (M_m - M_T) \quad (2)$$

式中,  $M_T$  为轮毂输出转矩, p. u.;  $T_h$  为轮毂惯性时间常数, s<sup>[3]</sup>。

(3) 异步发电机组模型

异步发电机采用忽略定子绕组暂态的机电暂态模型,如式(3)<sup>[2,3]</sup>。

$$\begin{cases} \frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_j} (M_E - M_T) \\ T'_{d0} \frac{dE'}{dt} = -E' - j(x - x') I - j2\pi f_0 T'_{d0} E'_s \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $T_j$  为转子惯性时间常数, s;  $s$  为发电机转差率,  $s = \frac{\omega_0 - \omega_r}{\omega_0}$ ;  $x = x_1 + x_m$ ,  $x_1$  为定子漏抗,  $x_m$  为激磁电抗;  $x' = x_1 + \frac{x_2 x_m}{x_2 + x_m}$  为发电机的暂态电抗;  $x_2$  为转子漏抗;  $r_2$  为转子绕组电阻;  $E'$  为发电机的暂态电势;  $I$  为发电机定子电流;  $T'_{d0} = \frac{x_2 + x_m}{r_2}$  为定子开路时转子回路的时间常数, s<sup>[4]</sup>。

(4) 异步发电机的电磁转矩

发电机电磁转矩方程为

$$M_e = \text{Re}(EI^*) \quad (4)$$

为简化计算,在系统仿真分析时,风电场采用如下等值的原则。

① 额定容量相等。等效额定容量  $s_\Sigma$  是所有风电机组额定容量之和,  $p_i$  是第  $i$  台风电机组的额定容量。即

$$s_\Sigma = \sum_{i=1}^n s_i \quad (5)$$

② 注入电网的功率相等。  $p_\Sigma$  是所有风电机组注入功率之和,  $p_i$  是第  $i$  台风电机组的注入功率,即<sup>[5]</sup>

$$p_\Sigma = \sum_{i=1}^n p_i \quad (6)$$

## 2 SMES 数学模型和控制策略

### 2.1 SMES 的工作原理

由于超导体的超导电性,电能可以电磁能的形式无损耗地存储于磁体当中。当系统处于工作状态时,超导磁体通过功率变换电路将磁体电流转换为换流器的直流支撑电压。图2所示是一种串联电压型 SMES 系统原理,主要针对电压敏感负荷,基本功能为对非正常电压进行动态补偿,以满足敏感负荷对电压质量的要求。

超导储能用换流器与普通逆变电路不同,简言之,换流器连接储能单元与电网,工作环境复杂,功率双向流动,对开关电路要求较高;通用逆变器作为电源设备,服务对象一般为用户负载,工作环境单一。所以,换流器必须具备电压等级较高、开关谐波含量少以及结构灵活易于维护等特点。

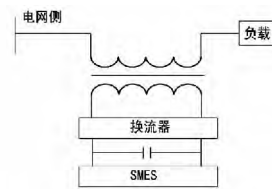


图2 SMES 系统原理图

### 2.2 SMES 的数学模型

采用 SMES 的风力发电系统如图3所示, SMES 单元接在风力发电机母线上,用来改善系统动态特性。以下介绍 SMES 调节原理,并建立 SMES 模型。

超导储能单元是柔性交流输电技术中的一种,由一个超导线圈( super conducting coil)、一个强制换向变换器( forced - commuted converter)、一个控制

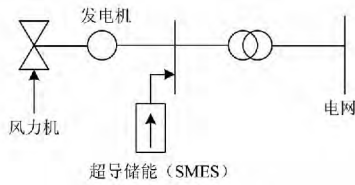


图 3 采用 SMES 的风力发电系统

器( controller) 组成。强制换向变换器是基于晶闸管的半导体开关,可工作于逆变器状态和整流器状态,使 SMES 单元在相应的状态下发出或吸收有功功率和无功功率。具有了这种功能的 SMES 单元可被看作是一个由有功和无功控制器控制幅值和相位的可控电流源<sup>[4,5]</sup>。

考虑到 SMES 是一种并联补偿装置,可以等效为一个可控的电流源,因此它的直流系统与交流电网的连接环节采用电流源型换流桥。为充分发挥 SMES 的有功无功的综合调节能力,采用双桥结构换流装置和不等触发角的控制方式,分别控制两个换流桥的触发角来控制直流电压的大小以及交流侧电压与电流的相角差,从而控制超导线圈的充放电以及与系统交换的无功功率。

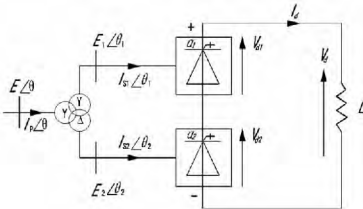


图 4 双桥 SMES 与交流系统的连接示意图

忽略变压器的损耗和换弧电抗,SMES 的数学模型如式(7)。

$$\begin{cases} V_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E (\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2) \\ I_{s1} = I_{s2} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \\ \theta_1 = \varphi_1 - \alpha_1 \\ \theta_2 = \varphi_2 - \alpha_2 \\ I_p \angle \theta = I_{s1} \angle \theta_1 + I_{s2} \angle \theta_2 \\ \frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L} V_d \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $V_d$ 、 $I_d$  分别为超导线圈上的直流电压和电流;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  为两个换流桥的触发角;  $V_{d1}$ 、 $V_{d2}$  为两换流桥直流侧的电压;  $I_{s1}$ 、 $\theta_1$ 、 $I_{s2}$ 、 $\theta_2$  分别为两换流桥交流侧电流的幅值与相角;  $E_1$ 、 $\varphi_1$ 、 $E_2$ 、 $\varphi_2$  为换流桥交流侧电压的幅值与相角;  $E$ 、 $\varphi$ 、 $I_p$ 、 $\theta$  是 SMES 与系统连接

点的节点电压和注入电流的幅值与相角。

### 2.3 SMES 的控制方式

并网风电场中严重扰动主要有系统的短路故障和阵风的扰动。为更好地模拟这两种扰动形式,需要选择 SMES 的安装地点和控制信号。风电场一般都由大量的分散分布的风电机组构成,在每台风电机组出口安装 SMES 装置势必增加系统的维护量,降低可靠性和经济性。因此选择 SMES 的安装地点为风电场升压站的低压侧,对风电场进行集中控制和调节。

异步发电机本身没有励磁装置,在输出有功功率的同时要从电网吸收大量的无功功率。随着风电场出力的增加,异步发电机吸收的无功功率也相应增加,机端电压随有功出力的增加而降低,电压的变化反映了风电场有功出力的变化。因此,选取电压偏差作为有功控制器的控制信号,对 SMES 应当补偿的有功功率进行调节。当风速变化使风电场出力增加时,风电场端电压降低 ( $\Delta U < 0$ ),为了平滑风电场的输出,应控制 SMES 装置吸收一定的有功功率,超导线圈充电,反之,应控制超导线圈放电,这与网络短路故障时提高稳定性防止风轮机失速的控制规律是一致的。由此可见,通过采用电压偏差作为 SMES 有功控制器的控制信号,能够充分发挥 SMES 有功无功综合调节的能力,使其既能满足提高暂态稳定性的要求又能够在风速扰动时降低风电场对电网的冲击。

附加控制器: 将反映超导线圈电流的信号  $\Delta\omega/\Delta P$  作为负反馈,送入有功控制器作为辅助控制可以加快超导线圈的电流恢复过程。

对于双桥系统,SMES 与交流系统交换的功率满足

$$\begin{cases} P_{SEMS} = V_{d0} I_d (\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2) \\ Q_{SEMS} = V_{d0} I_d (\sin\alpha_1 + \sin\alpha_2) \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $V_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E$  为理想空载情况下的单桥最大直流电压。

因为有两个控制信号  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ,所有可以实现对  $P_{SEMS}$ 、 $Q_{SEMS}$  的独立控制; SMES 有很快的响应速度,采用带有一阶惯性环节的比例控制已经就有很好的效果。有功和无功功率综合控制的思路是: 首先由控制信号  $\Delta\omega/\Delta P$  和  $\Delta U$  分别通过控制器产生期望控制功率  $P_{SEMS}^*$  和  $Q_{SEMS}^*$ ,然后再经过对 SMES 容量限制的处理后得到实际能够补偿的有功  $P^*$  和无功  $Q^*$ 。超导线圈电流  $I_d$  作为负反馈送入

有功控制作为辅助控制可以加快超导线圈的电流恢复过程。据此计算所需的控制角  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ 。触发角计算公式为

$$\begin{cases} \alpha_1 = \arccos(P_{SMES}/S) + \arccos(S/S_{max}) \\ \alpha_2 = \arccos(P_{SMES}/S) - \arccos(S/S_{max}) \end{cases} \quad (9)$$

式中  $S_{max} = 2U_{d0}I_d$ ;  $S = \sqrt{P_{SMES}^2 + Q_{SMES}^2}$ 。

根据上述分析,设计的 SMES 控制器框图如图 5 所示。

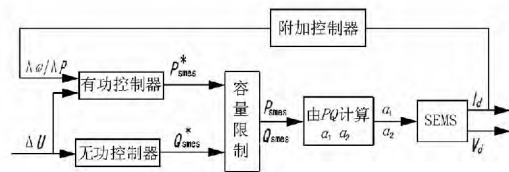


图 5 SMES 控制器框图

有功无功控制器采用带惯性环节的比例控制,其传递函数为

$$\begin{cases} P_{SMES}^* = \frac{K_p}{1 + T_p S} \Delta U \\ Q_{SMES}^* = \frac{K_{PQ}}{1 + T_Q S} \Delta U \end{cases} \quad (10)$$

其中  $\Delta U$  是 SMES 安装点的电压偏差量;  $T_Q$ 、 $T_p$  是有功和无功控制器的时间常数, SMES 吞吐功率的速度为毫秒级,时间常数可选为 0.025 ~ 0.05 s;  $K_p$ 、 $K_{PQ}$  是有功和无功控制器的放大倍数,其大小与 SMES 的最大注入功率、风电机组以及电网的参数有关。

当风速变化使风电场出力增加时,风电场端电压降低 ( $\Delta U < 0$ ),为了平滑风电场的输出,应控制 SMES 装置吸收一定的有功功率,超导线圈充电,反之,应控制超导线圈放电,这与网络短路故障时提高稳定性防止风轮机失速的控制规律是一致的。由此可见,通过采用电压偏差作为 SMES 有功控制器的控制信号,能够充分发挥 SMES 有功无功综合调节的能力,使其既能满足提高暂态稳定性的要求,又能够在风速扰动时降低风电场对电网的冲击<sup>[6-8]</sup>。

### 3 仿真分析

为了说明 SMES 在稳定风电场电压和提高风电系统运行性能方面的作用,采用图 5 所示的实例系统接线图进行仿真分析,其中风电场总装机容量为 99 MW,由 132 台 750 kW 风机组成,通过双回送电

线路接入系统。在风电场升压站低压侧(节点 11)接入 SMES 装置,分别对风电场在阵风干扰下和风电场送出线路(节点 9)附近发生三相短路故障两种情况下进行了仿真计算,仿真实例接线示意图如图 6<sup>[9,10]</sup>。

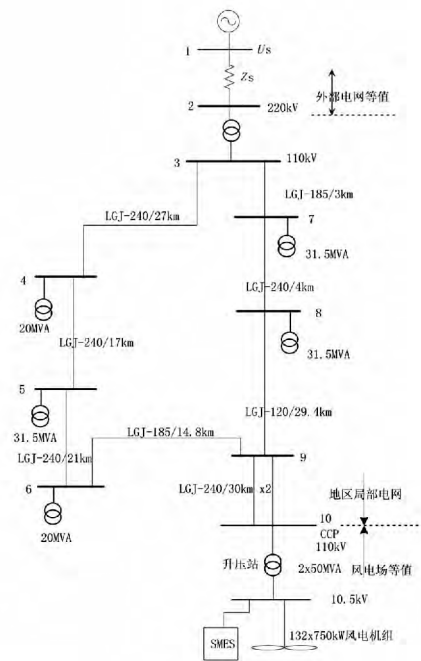


图 6 仿真电网接线示意图

#### 3.1 阵风扰动下仿真分析

在阵风扰动下的仿真结果如图 7 所示。可以看出,在阵风扰动下,SMES 有效地降低了有功和电压振荡的幅值和持续时间。SMES 快速的响应能力使它在较快的风速变化时对风电场输出的波动有很好抑制作用,平滑风电场的输出,阻尼功率和电压的振荡。通过仿真分析,显示了 SMES 在风电场小干扰下能够有效地稳定风电场电压的优良特性。

#### 3.2 故障扰动下仿真分析

在风电场没有任何控制措施的情况下,出口处发生严重故障的极限切除时间为 80 ms,这对保护装置的快速性提出了苛刻的要求。图 8(a)、(b)给出了 0.2 s 故障 0.28 s 切除一回线路的有功和电压变化曲线,从图 8(b)的仿真曲线可以看出,未安装 SMES 装置时,故障清除后,电压恢复过程较慢,电压低于 0.9 p.u. 的持续时间较长。在安装 SMES 装置后,可以将三相短路故障的极限切除时间提高到 145 ms,并且加快了电压和功率的恢复过程,有效地改善了风电场的稳定性。图 8(c)是切除时间为 120 ms 的风电场电压变化曲线,显然,没有 SMES 装置时电

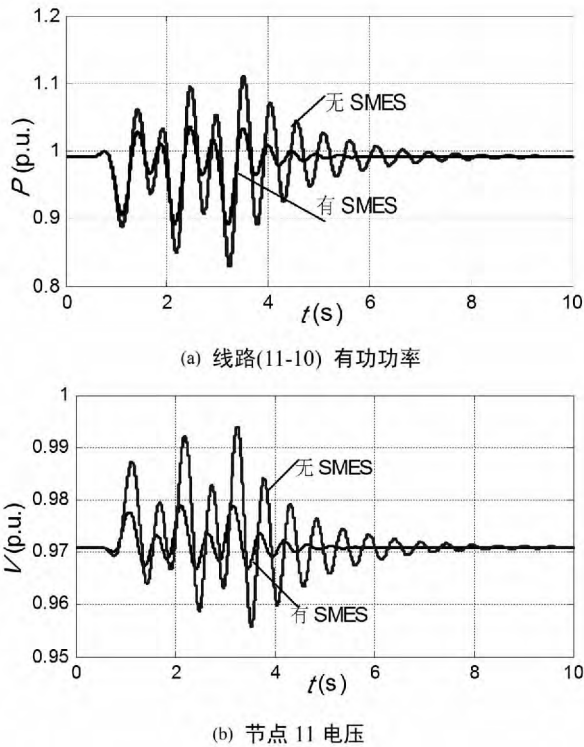


图7 阵风情况下风电场的电压和有功曲线

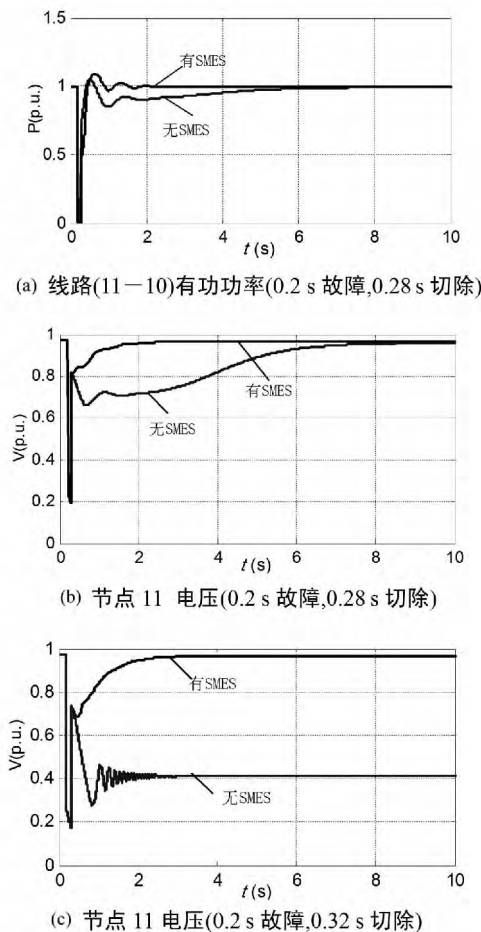


图8 短路故障后风电场出口电压和有功变化曲线

压很快失稳,而安装 SMES 装置可以使系统的电压

很快恢复。

以上的分析和仿真结果表明,通过采用合适的控制策略,使用超导储能装置不仅可以在网络故障后有效地提高风电场的稳定性,而且能够在快速的风速扰动下平滑风电场的输出,降低风电波动对电网的冲击。

## 4 结 论

针对并网风电场的功率波动对电网造成的影响,提出了 SMES 应用于风电场的控制方式,并进行了在阵风 and 三相短路故障两种情况下并网风电场的仿真研究。仿真结果表明,加装 SMES 的并网型风电场具有良好的动态性能,不仅能很好地吸收风电场输出有功功率的波动成分,有效平滑注入电网的有功功率,同时,SMES 也起到了抑制电网电压波动的作用。分析表明,通过合理选择 SMES 的控制方式,采用具有较小储能量的 SMES 就能够降低并网风电场在阵风扰动时对电网的影响,有效提高网络故障后风电场的稳定性。

### 参考文献

- [1] 吴学光,张学成,印永华,等.异步风力发电系统动态稳定性分析的数学模型及其应用[J].电网技术,1998,22(6):68-72.
- [2] 李先允,陈小虎,唐国庆.大型风力发电场等值建模研究综述[J].华北电力大学学报,2006,33(1):42-46.
- [3] 郑丽,马维新,李立春.超导储能装置提高电力系统暂态稳定性的研究[J].清华大学学报,2001,41(3):73-76.
- [4] Tripathy S C. Dynamic Simulation of Hybrid Wind Diesel Power Generation System with Superconducting Magnetic Energy Storage [J]. Energy Conversion and Management, 1997, 38(9):919-930.
- [5] 吴俊玲,吴畏,周双喜.超导储能改善并网风电场稳定性的研究[J].电工电能新技术,2004,7(3):59-63.
- [6] Anca D., Poul S., Frede B. Dynamic Modelling of Wind Farm Grid Interaction [J]. Wind Engineering, 2002, 26(4):191-208.
- [7] Akhmatov V, Knudsen H. An Aggregate Model of a Grid-connected, Large-scale, Offshore Wind Farm for Power Stability Investigations Importance of Windmill Mechanical System [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24(9):709-717.

### 作者简介:

闫广新(1981),硕士毕业,工程师,从事电力系统设计工作;

王 凯(1985),助理工程师,从事风电工程设计工作。

(收稿日期:2013-07-23)