

超导储能技术对智能电网电压稳定的影响

徐 建¹, 邱晓燕¹, 汪兴旺²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 宜宾电业局, 四川 宜宾 644000)

摘 要: 风力场并网是智能电网建设非常重要的一步, 针对风力场接入电网后对系统电压稳定性构成的影响, 提出在并网点加装超导储能装置 SMES 用以改善电压稳定性, 最后通过使用 PSASP 软件的 EPRI-36 节点系统作为仿真算例, 验证了超导储能装置在控制风速波动对电网电压稳定影响方面的有效性, 说明了超导储能技术对构建智能电网的作用。

关键词: 超导储能技术 SMES; 风力场并网; 电压稳定

Abstract: The wind farm integration is very important for smart grid but it has the undesirable influence on the voltage stability of power grid. Superconducting magnetic energy storage (SMES) is proposed to improve the voltage stability. The EPRI-36 system in power system analysis software package (PSASP) is taken for an example. The results indicate that the voltage stability of wind farm with SMES has been improved obviously, so SMES is proved highly effective in smart grid.

Key words: superconducting magnetic energy storage (SMES); wind farm integration; voltage stability

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0028-04

0 前 言

目前, 随着全球资源环境压力不断增大, 电力行业在安全运行、能源环保、市场竞争、企业管理等方面面临的压力日益突出, 随着计算机科学的发展, 以及材料、信息、电力电子等领域新技术带来的新驱动力, “智能电网”的概念应运而生, 已成为全球电力行业共同的研究课题。中国也开始逐步加大对智能电网的研究力度。与传统电网相比, 智能电网将以可靠、坚强、通畅的实体电网架构和信息互动平台为基础, 以服务生产全过程为目标, 并整合系统各种实时生产和运营信息, 通过加强对电网动态的分析、诊断和优化, 为电网运行和调度人员提供更为全面、更为完整和精细的电网运营状态图, 并给出辅助决策支持, 以及控制实施方案和应对预案, 最大可能实现更为精细、及时、准确、绩优的电网运行和管理^[1~3]。

以风能等可再生能源为代表的分布式电源 (distributed generation) 就是实现智能电网概念很好的办法。它是一种与传统集中供电模式完全不同的新型供电系统^[4]。以分散的方式布置在负荷所在的配电网中, 并具有可再生、占地少、清洁环保、供电可靠和发电方式灵活等特点^[5]。虽然风能因其储量巨大、

环保优势和规模效益等独特优势得到了长足发展, 但风电场并网引发诸如电压失稳等一系列电网运行安全问题也引起了人们广泛的关注^[6~9]。

超导储存装置 (superconducting magnetic energy storage SMES) 能够有效提高风力场并网后电网电压稳定性^[10~12]。早在电力工业发展初期, 储能技术就有了应用。目前, 超导储能装置因其容量大、效率高、响应快、无污染、控制方便、使用灵活等诸多优点开始在电力调峰、保障系统稳定和提高电能质量上发挥作用。随着智能电网研究和建设力度的加大, 超导储能技术迎来了蓬勃发展的新机遇^[13]。特别与如风能等可再生能源和分布式发电领域结合, 可以成为对提高系统运行稳定性、调整频率、补偿负荷波动的一种强有力的手段。

针对风力场并网后, 因风速等随机变化因素对电网电压暂态稳定的影响, 提出在并网点利用超导储能装置 SMES 提高电压稳定性, 通过 EPRI-36 节点系统作为算例, 并模拟风速的影响, 对比验证了超导储能装置对控制风力场并网口电压稳定的有效性, 说明了超导储能技术在构建智能电网的作用。

1 风力发电机模型

1.1 风力机空气动力模型

稳态情况下, 风力机从风能中捕获的功率由风速决定。

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S C_p v_m^3 \quad (1)$$

其中, ρ 是空气密度 (kg/m^3); $S = \pi R^2$ 是风机叶片的桨叶扫风面积 (m^2); C_p 是与气动性能有关的风能利用系数, 即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。它是叶尖速比 λ 的函数。其定义为

$$\lambda = \frac{R \omega_{WT}}{v_w} \quad (2)$$

其中, ω_{WT} 为风力机转速 (rad/s)。

C_p 与 λ 的关系如图 1 所示。

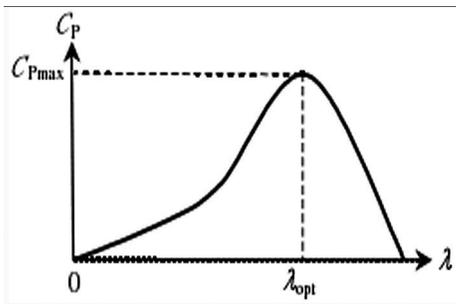


图 1 C_p 与 λ 的关系

在实际工程中, λ 和 β 与风能利用系数 C_p 有关系, 可以用下式表示。

$$C_p = c_1 (c_2 - c_3 \beta - c_4 \beta^2 - c_5) e^{-c_6 \beta} \quad (3)$$

其中, $\alpha = 2$, $c_1 = 0.5$, $c_2 = \lambda$, $c_3 = 0$, $c_4 = 0.22$, $c_5 = 0.17\lambda$, 这是通过风机的实际测量数据拟合的函数。

1.2 异步风力发电机 RX 模型

传统电力系统潮流计算将风力发电机组等值成为 PQ 节点, 并认为风力场的功率因素恒定不变。但是风电场多采用异步风力发电机, 发出有功的同时要吸收一定的无功, 必须在接入点加上无功补偿设备, 而吸收无功功率的大小和机端电压、发出的有功功率以及滑差等有关, 因此简单的将风力机处理成功率恒定的 PQ 节点会忽视风力场对电网特有的影响。

相对 PQ 模型, RX 模型把异步发电机的滑差表示成机端电压和有功功率的函数, 在给定初始滑差和风速的情况下, 将发电机看成阻抗型负荷加入潮流, 得到风力发电机的电磁功率, 再由风速计算出风电机的机械功率, 从而由两个功率之差值修正滑差, 反复迭代, 最终使得风电机机械功率与发电机电磁功率达到平衡。

1.3 风力场模型

对于一个安装有 n 台风力发电机的风电场, 为了简化计算, 忽略风电场内部线路损耗和变压器损耗, 不考虑风力发电机组分布的相对位置、风力场内部电网结构对计算的影响, 并假定所有机组具有相同的机端电压, 并且等于待求的风场母线电压。这样, 再则可以用一台发电机模型来表示风力场。

风力场总的有功功率就等于风力场内每台机组的有功功率之和, 总的无功功率等于风力场内每台机组的无功功率之和。

$$P_f = \sum_{i=1}^n P_{ei}(v_i) \quad (4)$$

$$Q_f = \sum_{i=1}^n Q_{ei}(P_{ei}, U_f) \quad (5)$$

其中, P_f , Q_f 分别为风电场总的有功和无功功率; P_{ei} , Q_{ei} 分别为第 i 台风电机组注入电网的有功和无功功率; v_i 为第 i 台风力机处的风速。

1.4 风速模型

风速对风力场出力影响最大, 目前一般采用简化的四分量模型来模拟风速随时间变化的特征^[14]。这里只简单介绍后面算例将会考虑的阵风模型。

阵风用于描述风速突变的特性。在风电系统的动态仿真中, 通常可以用它来考察风电系统在突变性风速扰动下的动态特性。

$$v_{wg}(t) = 0, \quad t < T_{sg} \quad (6)$$

$$v_{wg}(t) = \frac{A_{wg}}{2} \left(1 - \cos 2\pi \left(\frac{t - T_{sg}}{T_{eg} - T_{sg}} \right) \right), \quad T_{sg} \leq t \leq T_{eg} \quad (7)$$

$$v_{wg}(t) = 0, \quad t > T_{eg} \quad (8)$$

其中, $v_{wg}(t)$, T_{sg} , T_{eg} , A_{wg} , 分别表示阵风风速、阵风启动时间、结束时间、阵风幅值。

2 超导储能装置模型 (SMES)

超导储能装置是将能量以电磁能的形式储存在超导线圈中的一种储能装置。与其他储能装置相比, SMES 具有容量大、效率高、响应快、无污染、控制方便、使用灵活等诸多优点, 在风力场并网处使用 SMES 能够起到稳定电压的作用^[15, 16]。

2.1 超导储能装置的原理

SMES 的基本原理图如图 2 所示。当开关 K_1 闭合、 K_2 打开时, 超导线圈处于充放电状态; 当 K_1 打开、 K_2 闭合时, 超导线圈处于短路状态。因为超导线圈的电阻为 $R=0$, 所以电流可以在线圈中无衰减地永久流通。而超导储能装置一般可分为滤波器、超导线圈、变流器、制冷装置、失超保护及监控系统等 7 部

分。

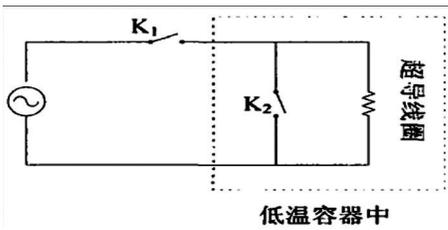


图 2 超导储能装置原理图

2.2 采用超导储能的风力场系统

具有超导储能装置的风力场系统如图 3 所示，SMES 单元接在异步发电机母线后，再与大电网相连接^[17]。

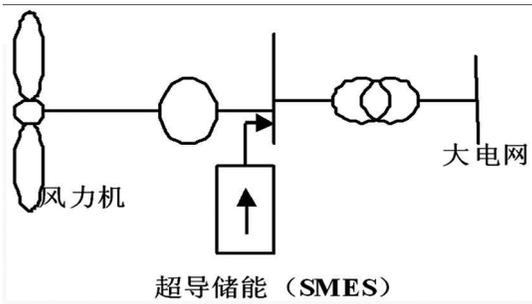


图 3 采用 SMES 的风力场系统

3 算例仿真计算与分析

3.1 算例模型

结合电力系统综合程序 (PSASP)，以软件自带的 EPR1-36 节点系统为算例，分析风力场接入对电网电压影响情况，并对比拥有超导储能装置情况下电压波动情况，以说明超导储能装置对提高电压稳定性的作用。EPR1-36 节点系统如图 4 所示。

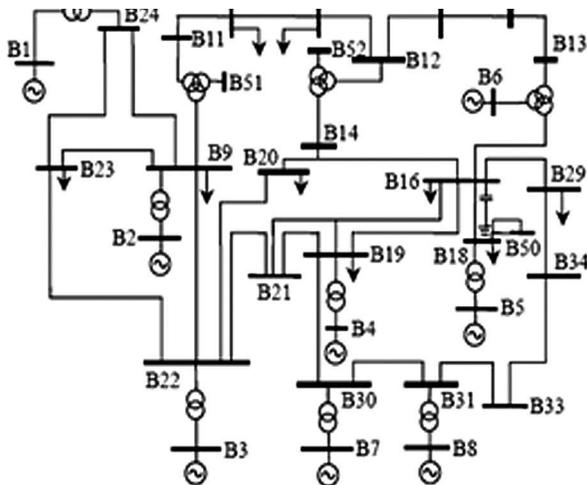


图 4 EPR1-36 节点系统

3.2 模型的处理

对于风速突变对电压的影响，将异步风力发电机按照 RX 模型处理，并模拟风力场在阵风扰动下的响应，以 0.05 s 为抽样步长，得出风力场的输出功率随风速的变化拟合曲线，用以模拟风速突变引起发电机出力的变化^[18]。

风力场的输出功率在阵风扰动时，功率变化的拟合曲线如图 5 和图 6 所示。

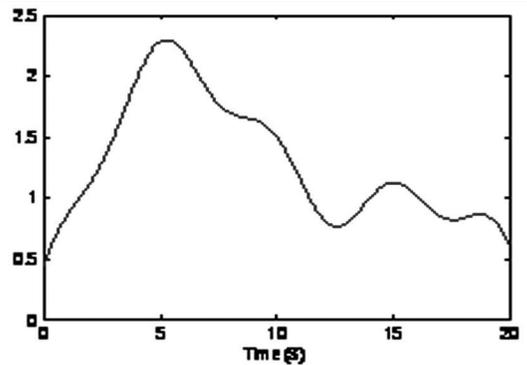


图 5 有功功率变化曲线

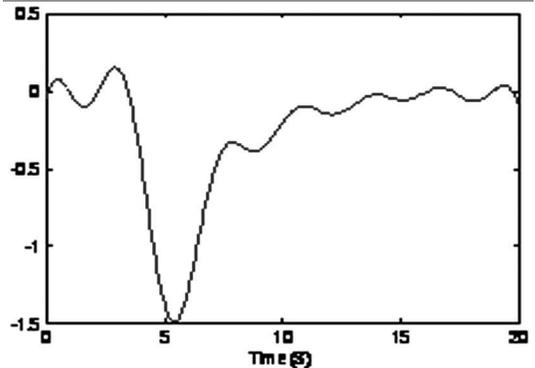


图 6 无功功率变化曲线

对于装有超导储能装置 SMES 的风力场，采用 PQ 模型以简化计算，并选取适当的接入电网的容量。

3.3 仿真计算

EPR1-36 节点系统基准容量为 100 MVA，风力场采用容量为 1 MW 的异步电机，设定台数为 50 台，全部投入使用时，总装机容量为 50 MW，占系统最大负荷 1%，并将风力场通过 34 节点接入系统^[7]。

在 PSASP 软件上，将风力场在阵风扰动下有功和无功短时的变化情况以节点扰动形式输入软件仿真，并和装有超导储能装置情况经运行对比，最后仿真结果和对比情况如图 7 所示。

3.4 结果分析

从上面仿真结果看出，风速的变化对系统电压影响较大。随风速的增加，母线电压增加，随后逐渐才稳定。而装备有超导储能装置的风力场能够有效地

控制电压的波动。

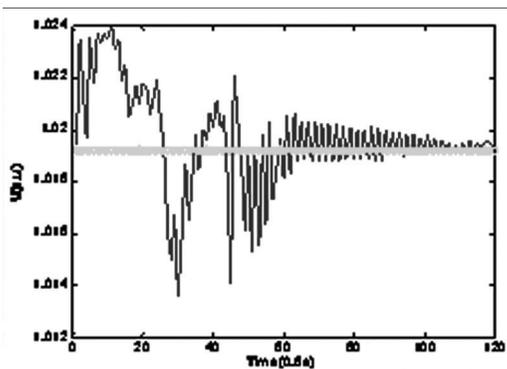


图 7 母线电压波动情况

4 结 论

风力场并网是建设智能电网非常重要的手段,模拟了风力场在风速突变后有功和无功输出的变化,通过算例仿真出其导致系统短期电压波动情况,并和采用超到储能装置的风力场进行了对比,说明了超导储能装置控制风力场并网电压暂态稳定性的作用。当然,为了方便对比,将采用超导储能装置的风力场简单地设定为 PQ 节点,没有考虑超导储能装置的控制策略和储能容量的选取,而这两个因素却对超导储能装置在智能电网中的应用前景有很大的影响,笔者在以后的研究中还将继续深入探讨下去。

参考文献

- [1] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.
- [2] 张文亮, 刘壮志, 王明俊, 等. 智能电网的研究进展及发展趋势 [J]. 电网技术, 2009, 33(13): 1-11.
- [3] 钟金, 郑睿敏, 杨卫红, 等. 建设信息时代的智能电网 [J]. 电网技术, 2009, 33(13): 12-18.
- [4] 丁明, 王敏. 分布式发电技术 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7): 31-36.
- [5] 钱科军, 袁越. 分布式发电技术及其对电力系统的影响 [J]. 继电器, 2007, 35(13): 25-29.
- [6] 陈海焱, 段献忠, 陈金富. 分布式发电对配网静态电压稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2006, 30(19): 27-30.
- [7] 李斌, 刘天琪, 李兴源. 分布式电源接入对系统电压稳定性的影响 [J]. 电网技术, 2009, 33(3): 84-88.
- [8] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89.
- [9] 刘杨华, 吴政球. 分布式发电及其并网技术综述 [J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.
- [10] Kyung S K, McKenzie K J, Liu Y L et al. A study on applications of energy storage for the wind power operation in power systems [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting Montreal Quebec Canada 2006.
- [11] Billinton R B. Reliability considerations in the utilization of wind energy solar energy and energy storage in electric power systems [C]. International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems Stockholm, Sweden 2006: 1-6.
- [12] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用 [J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.
- [13] Jewell W T. Electric industry infrastructure for sustainability: climate change and energy storage [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting Tampa USA, 2007.
- [14] Bongers PM. Modeling and Identification of Flexible Wind Turbines a Factorizational Approach to Robust Control [M]. Delft University Press June 1994.
- [15] Ha Thu Le, Surya Santoso. Analysis of voltage stability and optimal wind power penetration limits for a non-radial network with an energy storage system [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting Tampa USA, 2007.
- [16] Cesar A. Luongo. Superconducting storage systems: an overview [C]. IEEE Transactions on magnetics July 1996.
- [17] 陈星莺, 刘孟觉, 单渊达. 超导储能单元在并网型风力发电系统的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 63-66.
- [18] 徐娇. 异步风力发电系统并网运行研究 [D]. 四川大学硕士学位论文, 2008.
- [19] 刘天琪, 邱晓燕. 电力系统分析理论 [M]. 科学出版社, 2004.
- [20] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖. 电力系统电压稳定性及其控制 [M]. 中国电力出版社, 2004.

作者简介:

徐建 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统电压稳定及无功优化计算。

邱晓燕 (1964-), 女, 教授, 主要研究方向: 电力系统稳定与控制。

(收稿日期: 2009-10-10)