

超导储能装置提高风电场暂态稳定性的研究

张占奎¹, 王德意¹, 迟永宁², 李琰², 王伟胜²

(1. 西安理工大学电力工程系, 陕西 西安 710048; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 对风电场安装使用超导磁储能装置增强风电场暂态稳定性进行了研究。在建立超导磁储能装置模型的基础上, 提出了改善并网风电场暂态稳定性的超导磁储能装置控制策略, 采用以网侧电压定向的矢量控制方案并通过附加前馈项实现其输出有功功率、无功功率的解耦控制。在电力系统分析软件 DIgSILENT/PowerFactory 中建立了超导磁储能装置及其控制的仿真模型, 基于实际电网及风电场的仿真结果验证了所建模型的正确性、控制策略的可行性。简要介绍了超导磁储能装置在并网风力发电系统的应用前景。

关键词: 风电场; 超导储能; 暂态稳定; 前馈解耦; 矢量控制

Study of transient stability enhancement of wind farm by application of superconducting magnetic energy storage devices

ZHANG Zhan-kui¹, WANG De-yi¹, CHI Yong-ning², LI Yan², WANG Wei-sheng²

(1. Department of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The application of superconducting magnetic energy storage (SMES) devices to improve wind farm transient stability is researched. Based on the modeling of the SMES, the corresponding SMES control strategy is designed for the improvement of wind farm transient stability. The SMES output active and reactive power decoupling control is achieved by adopting a grid-side voltage-oriented vector control programs and through additional feed-forward options. The simulation model of SMES and its control system are established in power system analysis software DIgSILENT/PowerFactory. The simulation of an actual areas wind farm verifies the validity of the model and the feasibility of the control strategy. Finally, a brief introduction is given about the application prospect of SMES device in grid integration wind power generation system.

Key words: wind farm; superconducting magnetic energy storage (SMES); transient stability; feed-forward decoupled; vector control

中图分类号: TM74; TM917 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0038-05

0 引言

风力发电作为最具有商业化发展前景的可再生能源发电在世界范围内得到了快速的发展。近几年随着《可再生能源法》的颁布, 我国的风电装机容量成倍增长, 并网风电场的规模越来越大, 接入电压等级也越来越高^[1]。由于风能是一种随机性和间歇性的能源, 无法提供持续稳定的供电, 可靠性较差; 另外我国目前已经投入运行风电场中的风电机组有相当一部分是基于普通异步发电机技术的, 运行时需要系统提供大量的无功支持, 会影响到原有电网的运行稳定性^[2]。随着风力发电规模越来越大, 迫切需要对如何改善并网风电场动态特性进行研究。

由于储能系统具备向电力系统提供频率控制、快速功率响应等能力, 使得利用储能系统改善风电场功率输出动态特性成为研究热点^[3-4]; 目前, 超导储能系统 (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES) 随着高温超导技术的突破和电力电子技术的发展已经在美国、日本、欧洲一些国家的电力系统中得到初步的应用, 其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^[5-6]。

本文对超导储能应用于并网风电场的可行性及控制策略进行了研究, 以利用超导储能装置灵活的四象限调节能力改善并网风电场的动态特性, 提高并网风电场运行的稳定性; 建立了采用电流源型变

流器的超导储能系统数学模型, 设计了基于网侧电压定向的矢量控制方案的前馈解耦控制器, 通过实际系统的仿真研究验证了超导储能系统对并网风电场暂态稳定性的改善作用。

1 异步机风电场建模

基于普通异步发电机的恒速风电机组由异步发电机、风力机、机械传动系统(即轴系)和桨距角控制系统构成, 其模型如图 1 所示。

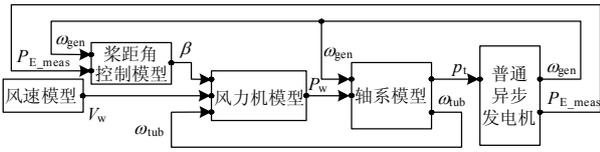


图 1 风电机组模型结构示意图

Fig.1 Structure diagram of wind turbine model

其中风速模型采用简化的平均风速模型; 桨距角控制模型根据控制策略的不同采用不同的控制规律, 其输入信号为风电机组转速的参考值; 轴系模型采用两质块模型; 恒速风电机组的异步发电机没有任何的附加控制系统, 且由于在运行中需吸收大量无功功率, 因此风电机组配备有机端并联电容器组以补偿其消耗的无功^[7]。

为减少计算量, 本文对风电场进行等值处理。对于包含大量风电机组的并网风电场, 每台风机所处位置不同, 每条馈线上传输功率也不同, 这些因素都直接影响风电场的输出特性。如果将风电场等效为单机系统, 会引起较大的计算误差。因此, 本文采用考虑风电场内风电机组排列布置的风电场模型。建模时, 首先根据风电场内风电机组的连接、电网结构以及馈线是否连接于风电场升压站同一段母线等因素, 对风电机组进行分组等值; 然后再对风电机组间的馈线进行等值, 最后得出风电场的动态等值模型^[8]。

2 超导储能系统建模及控制策略研究

2.1 超导储能系统原理及其数学模型

超导储能系统是 20 世纪 90 年代发展起来的一种新型储能技术, 具有储能效率高、响应速度快、功率四象限可调的特点^[9-10]。图 2 所示为超导储能系统装置的基本结构原理图。

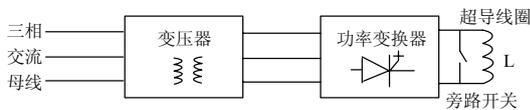


图 2 SMES 结构框图

Fig.2 Structure diagram of SMES

由图 2 可见, 超导储能系统主要包括超导磁体线圈和交流装置。前者可等效为一个电感, 其储存的能量与电流的平方成正比; 后者主要有电流源型逆变器和电压源型逆变器加斩波器两种^[11]。因为超导磁体在电力系统中的作用在本质上可等效为一个注入电流源, 并且采用电流源型逆变器 (Current Source Converter, CSC) 的 SMES 在拓扑结构上不需要斩波器, 可以通过直接调节磁体电流来改变储能, 结构和控制更简单、响应也更迅速^[12], 本文采用 CSC 作为连接超导电感线圈与电网的交流装置。

图 3 所示为采用 CSC 的 SMES 的拓扑结构图, 并有以下假设: (1) 电网电动势为三相平稳的纯正弦电动势 (\$e_a, e_b, e_c\$); (2) 交流、直流侧滤波电感均是线性的, 且不考虑饱和; (3) 开关损耗已折合到 CSC 直流侧, 且包含在 \$R_{dc}\$ 之中。

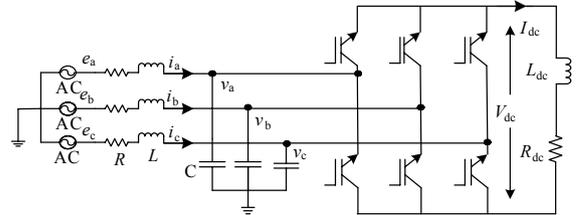


图 3 CSC 型 SMES 结构框图

Fig.3 Structure diagram of CSC-SMES

式 (1) 给出了采用 CSC 的 SMES 在同步旋转 d-q 坐标系下的改进模型:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = -(R_{dc} + R_L)i_d + \omega L_{dc}i_q + u_d \\ L \frac{di_q}{dt} = -(R_{dc} + R_L)i_q - \omega L_{dc}i_d + u_q \\ C \frac{du_d}{dt} = -i_d + C\omega u_q + i_{id} \\ C \frac{du_q}{dt} = -i_q - C\omega u_d + i_{iq} \\ L_{dc} \frac{di}{dt} = -2R_{dc}i + 3e_d i_d + 3e_q i_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i = i_{dc}^2$, $u_d = e_d - v_d$, $u_q = e_q - v_q$, $i_{id} = i_{dc}\sigma_d - C\omega e_d$, $i_{iq} = i_{dc}\sigma_q - C\omega e_q$ 。且 e_d, e_q, v_d, v_q 分别为网侧电压和 CSC 交流侧电压的 d-q 分量; $i_d, i_q, \sigma_d, \sigma_q$ 分别为网侧电流和 CSC 三值逻辑开关函数的 d、q 分量; L, C 分别为交流侧滤波电感电容; $L_{dc}, R_{dc}, V_{dc}, I_{dc}$ 分别为直流侧电感、电阻、电压和电流。

2.2 基于网侧电压定向的前馈解耦控制策略及控制系统设计

为了减少日常维护和降低控制系统的复杂性，本文选择在风电场升压变低压侧集中安装 SMES。以风电场升压变低压侧有功功率 P 和电压 U 为控制目标，采用电网电压定向的矢量控制方案并通过附加前馈项实现其解耦控制。取参考坐标系的 d 轴与网侧电压矢量方向一致，q 轴超前 d 轴 90° ，则 $e_q = 0$ ， $e_d + je_q = e_d$ 。

同时 SMES 与电网交换的有功、无功功率可表示为：

$$\begin{cases} P_{sm} = e_d i_d + e_q i_q \\ Q_{sm} = e_q i_d - e_d i_q \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_{sm} = e_d i_d \\ Q_{sm} = -e_d i_q \end{cases} \quad (2)$$

可见，在以网侧电压定向的同步旋转坐标系下，网侧有功电流和无功电流是完全解耦的。但是对网侧电流的控制是通过间接控制 CSC 交流侧电流的 d-q 轴分量 i_{cd} ， i_{cq} 实现的，因此需要推导 i_{cd} ， i_{cq} 与 i_d ， i_q 的关系。对式 (1) 变换可得：

$$\begin{bmatrix} sCR + s^2LC - \omega^2C^2 + 1 & -\omega CR - s\omega C^2 - s\omega LC \\ \omega CR + s\omega C^2 + s\omega LC & sCR + s^2LC + \omega^2C^2 + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -sC & \omega C \\ -\omega C & -sC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} \quad (3)$$

可见控制电流 i_{cd} ， i_{cq} 之间存在耦合，因此可以通过附加前馈项来实现解耦。

此外，对于 CSC 变流器，其 AC/DC 电流值的关系可表示为：

$$\begin{cases} i_{cd} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} P_{md} i_{dc} \\ i_{cq} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} P_{mq} i_{dc} \end{cases} \quad (4)$$

式中， P_{md} 和 P_{mq} 分别为变流器调制系数 P_m 在 d、q 轴的分量。

图 4 为 SMES 的控制系统框图，包含下面几个部分：(1) 有功、无功测量环节：用于测量 SMES 发出的有功与无功功率并将信号传输至控制器。(2) PLL 锁相环测量模块：用于测量网侧电压的相角，以确定网侧电压矢量位置用于网侧电压定向的解耦控制。(3) 控制器：解耦控制超导储能系统向电网发出的有功与无功功率，采用了网侧电压定向的矢量控制方法，不直接控制交换的有功与无功，而是通过控制 SMES 交流侧电流的 d-q 轴分量实现。控制器由两级闭环 PI 控制器组成，分别是慢速功率控

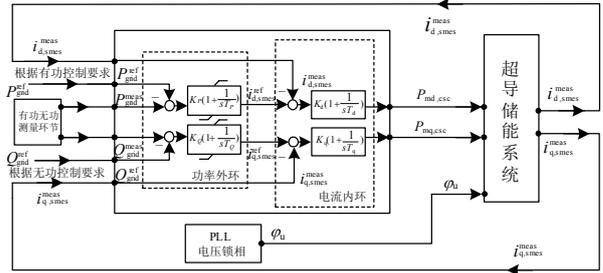


图 4 SMES 控制框图

Fig.4 Control block diagram of SMES

制外环与快速电流控制内环。

SMES 交流侧电流在 d 轴方向与网侧电压方向一致的同步旋转 d-q 坐标系下分解为两个互相垂直的分量。由解耦控制原理可知，单独控制 i_{cd} 便可控制 SMES 有功功率，单独控制 i_{cq} 便可控制 SMES 无功功率。功率控制闭环产生电流分量的参考值用于电流的内环控制，电流控制闭环产生用于控制 SMES 交流侧电流的脉宽调制系数的值，在 PWM 变流器中脉宽调制系数 P_{md} 和 P_{mq} 为变频器的控制变量，对应于预先定义的直流环节的直流电流，对应关系如式 (4) 所示。其中有功功率的参考值由风电场期望出力和实际出力之间的差值确定，其目标是使风电场的有功输出按照预定计划进行。无功功率的参考值则根据电压设定值计算出需要 SMES 发出的无功功率值动态确定，如图 5 所示。

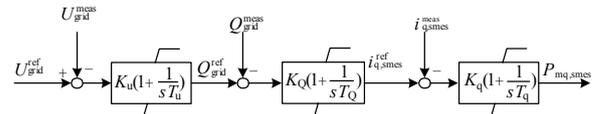


图 5 无功功率参考值的动态确定

Fig.5 Dynamics determination of Qref

制外环与快速电流控制内环。

根据给定的电压参考值与故障过程中实际测得的电压值比较，其误差信号经过 PI 控制器，确定 SMES 需要发出的无功参考值，再通过内环的电流控制来调整 SMES 实际发出无功功率以帮助风电场在故障后重建电压至给定的参考值，其目标是维持风电场电压稳定。

3 算例仿真

3.1 算例设定

本文在 DigSILENT/PowerFactory 中搭建异步机风电场和 SMES 仿真模型。其中风电场由 66 台异步风电机组构成，单机容量为 750 kW，机端电压 0.69 kV；风电场升压变的额定容量为 50 MVA，变比为 220 kV/35 kV；集电线路为导线型号 LGJ-185、

长 21 km 的架空线路; 送出线路为 LGJ-240、长度 18 km 的架空线路。通常, 普通异步机风电场需要无功补偿, 该风电场按额定容量的 25% 进行补偿。图 6 所示为算例中风电场示意图, SMES 集中安装在风电场 35 kV 母线侧。

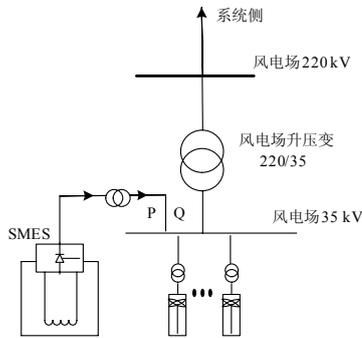


图 6 并网风电场示意图

Fig.6 Simple diagram of wind farm with SMES

3.2 算例研究

3.2.1 SMES 平滑风电场有功出力波动

仿真中, SMES 有功功率的参考值由风电场期望出力与实际出力之间的差值确定, 同时将提前 5 min 风速预测值的平均值对应的风电功率作为风电场的期望有功出力值。

图 7 所示为风电场提前 5 min 的风速预测值, 与之对应的风电场出力见图 8 中的虚线, 实线为投入 SMES 后的风电场的输出功率曲线; 图 9 所示为两种情况下风电场并网点电压变化曲线。

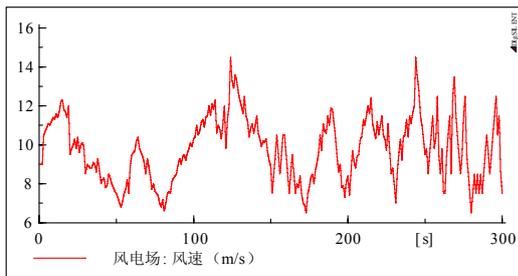


图 7 仿真所用的风速信号

Fig.7 Wind speed signal for simulation

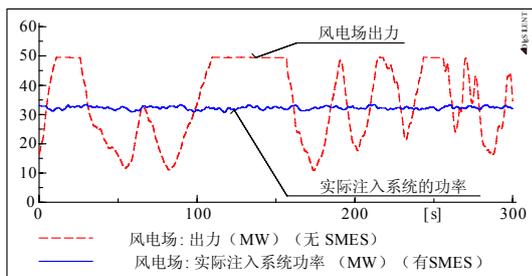


图 8 SMES 平滑风电场有功输出

Fig.8 SMES smooth the output power

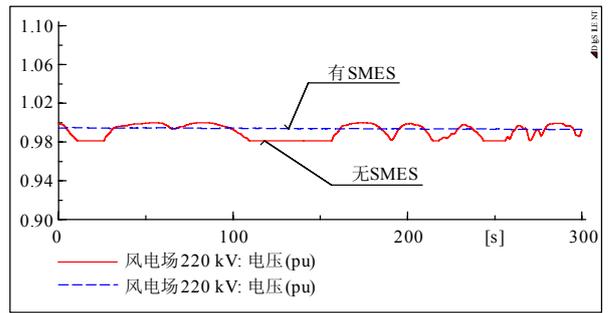


图 9 风电场并网点电压曲线

Fig.9 Voltage of the point of the grid integration

可见 SMES 在其容量范围内, 能够有效减小风电场有功出力波动及风电场电压的波动, 有利于改善风电场的电能质量并降低风电场对电网的影响。

3.2.2 SMES 改善并网风电场暂态稳定性

为了说明超导储能系统对并网风电场暂态稳定性的改善作用, 仿真中假设网内一条 220 kV 输电线路在 0.2 s 时发生三相接地短路故障, 0.12 s 后故障线路切除。故障情况下风电场内风电机组的转速以及风电场并网点电压恢复曲线分别如图 10 和图 11 所示, 图中虚线所示为风电场未安装 SMES, 实线所示为风电场安装 SMES。

由图可见: 未安装 SMES 时, 故障发生后风电场并网点电压迅速跌落, 且由于电压跌落导致风电

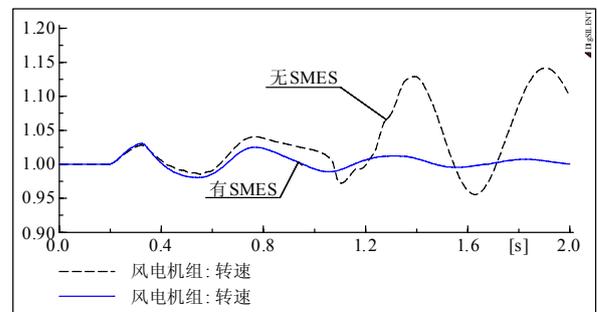


图 10 网内输电线路发生三相接地短路故障

Fig.10 Three-phase to ground fault

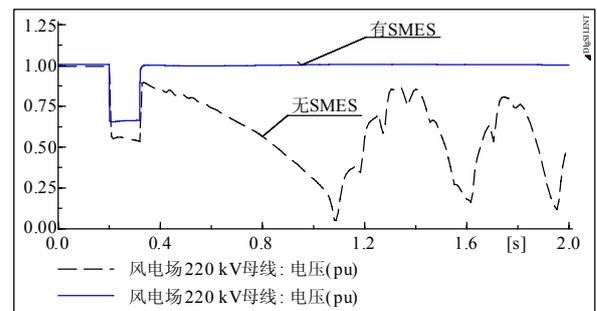


图 11 风电场并网点电压曲线

Fig.11 Voltage of the point of the grid integration

场有功功率难以完全送出, 机械功率与电磁功率之间的差额引起风电机组转子逐步加速, 最终导致电压崩溃, 机组超速, 风电场失稳; 安装 SMES 时, 故障后并网点电压跌落幅度较小, 且故障切除后在 SMES 的快速调节作用下, 并网点电压迅速恢复稳定, 风电机组转速减幅振荡并在 2 s 内恢复稳定。

仿真表明 SMES 在电网故障时, 可以快速进行无功补偿, 帮助风电场尽快恢复稳定运行, 起到了提高风电场暂态稳定性的作用, 充分显现了其快速灵活的调节能力。

4 超导储能装置在并网风电场的应用前景

超导储能装置应用的主要问题就是要降低其价格和其性能。始于 20 世纪 80 年代的高温超导材料的采用将逐步降低整个超导储能系统的价格, 使经济性和可靠性得到提高。根据美国“加速涂层导体发展计划”, 美国超导公司计划将高温超导带材的价格降低到 10~25 \$/kA·m, 届时高温超导储能应用将完全具备实用化推广的可能。日本东京电力公司对高温超导材料在大规模超导储能中应用的经济性研究表明: 高性能高温超导材料的使用将使超导储能在造价上并不比压缩空气、抽水蓄能等高很多, 在商业上具有竞争力。

同时随着风力发电向规模化、产业化发展以及各方面对高质量电能的需求, 超导储能装置必将在并网型风电系统中大量应用。

5 结论

(1) 通过对采用 CSC 型变流器的 SMES 的有效控制, 可以有效减小风电场输出有功功率的波动, 起到平滑有功, 改善电能质量的作用。

(2) SMES 在电网故障时, 可以快速进行无功补偿和电压控制, 提高并网风电场的暂态稳定性, 使风电场尽快恢复稳定运行, 充分显现了其快速灵活的调节能力。

(3) SMES 相比其他储能方式具有很多优越的性能, 对其进行研究也是可再生能源发电和智能电网发展的需要。本文给出的模型和控制策略, 有效地实现了解耦控制, 体现了 SMES 装置用于改善并网风电场运行的暂态稳定性的优势所在, 为进一步研究其在风电领域的应用奠定了基础。

参考文献

[1] 戴慧珠, 陈默子, 王伟胜, 等. 中国风电发展现状及有关技术服务[J]. 中国电力, 2005, 38(1): 80-84. DAI Hui-zhu, CHEN Mo-zi, WANG Wei-sheng, et al. The status of wind power development and technical

supports in China[J]. Electric Power, 2005, 38(1): 80-84.

[2] 迟永宁, 关宏亮, 王伟胜. SVC与桨距角控制改善异步机风电场暂态电压稳定性[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 95-104. CHI Yong-ning, GUAN Hong-liang, WANG Wei-sheng. Enhancement of transient voltage stability of induction generator based wind farm by SVC and pitch control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 95-104.

[3] Barton J P, Infield D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, (2): 441-448.

[4] 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: 自然科学版, 2001, 41(3): 73-76. ZHENG Li, MA Wei-xin, LI Li-chun. Superconducting magnetic energy storage system for enhancing transient stability[J]. Journal of Tsinghua University: Sci and Tech, 2001, 41(3): 73-76.

[5] 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. CHEN Xing-ying, LIU Meng-jue, SHAN Yuan-da. Application of superconducting magnetic energy storage system-SMES in wind power system of network-forming[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 63-66.

[6] 关天祺, 梅生伟, 卢强, 等. 超导储能装置的非线性鲁棒控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(17): 1-6. GUAN Tian-qi, MEI Sheng-wei, LU Qiang, et al. Nonlinear robust control design for power system including superconducting magnetic energy storage devices[J]. Automation of Electrical Power Systems, 2001, 25(17): 1-6.

[7] Chompooiwai C, Yingvivanapong C, Methaprayoon K, et al. Reactive compensation techniques to improve the ride-through capability of wind turbine during disturbance[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 31: 666-672.

[8] 曹娜, 于群, 戴慧珠. 风速波动时风电场动态特性分析[J]. 太阳能学报, 2009, 30(4): 497-501. CAO Na, YU Qun, DAI Hui-zhu. Dynamic character analysis of wind farm under wind fluctuation[J]. Tacta Energiae Solaris Sinica, 2009, 30(4): 497-501.

[9] 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, 24(3): 59-63. WU Jun-ling, WU Wei, ZHOU Shuang-xi. Study on SMES unit for improving the stability of power system connected with wind farms[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2004, 24(3): 59-63.

(下转第 47 页 continued on page 47)

- [6] 葛耀中. 自适应继电保护及其前景展望[J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (9) : 42-46.
GE Yao-zhong. Adaptive protection relay and its prospect of development[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21 (9) : 42-46.
- [7] 李九虎, 郑玉平, 古世东, 等. 电子式互感器在数字化变电站的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (7) : 94-98.
LI Jiu-hu, ZHENG Yu-ping, GU Shi-dong, et al. Application of electronic instrument transformer in digital substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (7) : 94-98.
- [8] 李冬辉, 史临潼. 小波理论在直流系统接地故障检测中的应用[J]. 继电器, 2004, 32 (21) : 29-33.
LI Dong-hui, SHI Lin-tong. Method for detecting DC system grounding fault based on wavelet transform[J]. Relay, 2004, 32 (21) : 29-33.
- [9] 何正友, 陈小勤, 等. 基于暂态电流小波熵权的输电线路故障选相方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 39-43.
HE Zheng-you, CHEN Xiao-qin, et al. Faulted phase selecting method of transmission lines based on wavelet entropy weight of transient current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (21) : 39-43.
- [10] 徐勇, 胡德. 小波网络在故障诊断中的应用研究[J]. 继电器, 2000, 28 (8) : 13-15.
XU Yong, HU De. Application of the wavelet neural network in PD fault diagnosis of electrical power transformers[J]. Relay, 2000, 28 (8) : 13-15.
- [11] 李贵存, 刘万顺, 贾清泉, 等. 一种利用小波原理防止变压器差动保护误动的新算法[J]. 电网技术, 2001, 25 (7) : 48-51.
LI Gui-cun, LIU Wan-shun, JIA Qing-quan, et al. A new algorithm to prevent misoperation of transformer based on principle of wavelet transform[J]. Power System Technology, 2001, 25 (7) : 48-51.
- [12] 苏斌, 董新洲, 孙元章. 基于小波变换的行波差动保护[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (18) : 25-29.
SU Bin, DONG Xin-zhou, SUN Yuan-zhang. Traveling wave differential protection based on wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (18) : 25-29.
- [13] 邵能灵, 侯志俭, 李晓华, 等. 基于多尺度B样条小波的发电机采样值差动保护[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (7) : 28-32.
TAI Neng-ling, HOU Zhi-jian, LI Xiao-hua, et al. New generator sample differential protection based on B-Spline wavelets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (7) : 28-32.

收稿日期: 2009-12-24; 修回日期: 2010-01-25

作者简介:

熊小伏 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统保护与监控研究;

王胜涛 (1984-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统保护研究. E-mail: shengtao1092@sina.com

(上接第 42 页 continued from page 42)

- [10] Taguchi A, Imayoshi T, Nagafuchi T, et al. A study of SMES control logic for power system stabilization[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 2343-2346.
- [11] 张崇巍, 张兴. PWM整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 325-330.
- [12] Lee Y S. Superconducting magnetic energy storage controller design and stability analysis for a power system with various load characteristics[J]. Electric Power Systems Research, 1999, 51 (1) : 33-41.
- [13] Walker L H. 10MW GTO converter for battery peaking service[J]. IEEE Trans Industry Application, 1990, 26 (1) : 63-72.
- [14] 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.
ZHANG Wen-liang, QIU Ming, LAI Xiao-kang. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power System Technology, 2008, 32 (7) : 1-9.
- [15] 李艳, 程时杰, 潘垣. 超导磁储能系统的自适应单神经元控制[J]. 电网技术, 2005, 29 (20) : 57-61.
LI Yan, CHENG Shi-jie, PAN Yuan. Adaptive single neuron based control for superconducting magnetic energy storage unit[J]. Power System Technology, 2005, 29 (20) : 57-61.
- [16] Dechanupaprittha S, Hongesombut K, Watanabe M, et al. Stabilization of tie-line power flow by robust SMES controller for interconnected power system with wind farms[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2007, 17 (2) : 2365-2368.

收稿日期: 2009-12-19; 修回日期: 2010-02-12

作者简介:

张占奎 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统分析和风力发电并网研究; E-mail: zkzhang@epri.sgcc.com.cn

王德意 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统分析及同步电机励磁系统方面的研究;

迟永宁 (1973-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为风电并网、电力系统稳定与控制。