

# 含有 SMES 电力系统次同步谐振的抑制研究

秦浩庭<sup>1</sup>, 刘 燕<sup>2</sup>, 徐根厚<sup>1</sup>, 张永祥<sup>1</sup>

(1 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2 四川电力职业技术学院, 四川 成都 610072)

**摘 要:**随着中国社会主义市场经济日趋深化, 国民经济日益迅速的发展, 用电负荷迅速增长, 电网的输送容量也在不断地增大, 输电距离不断加长。在这样的发展背景下串联补偿作为提高线路输电能力的手段在电网规划中越来越受到关注, 但是在超高压远距离输电系统中采用串联电容补偿后, 在某种运行方式或补偿度的情况下, 会发生电力系统的次同步谐振 (SSR) 现象。柔性交流输电技术在电力系统有着广阔的应用前景, 是近年来电力系统研究的前沿课题之一。而超导磁储能系统 (SMES) 是 FACTS 家族的新型重要成员, 是储能补偿装置的代表。采用扫频—复转矩法分析系统的次同步谐振, 摒弃传统的 PID 控制策略, 设计多目标控制算法实现对 SMES 装置的系统级控制, 使其在进行无功补偿的同时可以阻尼电力系统次同步谐振现象, 这既有理论又有现实意义。

**关键词:**次同步谐振; 超导磁储能; 柔性交流输电技术

**Abstract:** With the deep development of socialistic market economy in China and the rapid development of the national economy, the customers' load is growing rapidly, the transmitting capacity of power grid is also increasing continuously and the transmission distance is continually lengthened. Under such background, more and more attention is paid to the series capacitor compensation, which is an important measure to improve the transmission capacity of transmission lines. But after the series capacitor compensation is used in the extra-high voltage long-distance transmission system, sub-synchronous resonance (SSR) will occur in a certain operation mode or compensation degree. Flexible AC transmission system (FACTS) will be widely used in power system, and it is one of the advanced subject of power system in recent years. And the superconducting magnetic energy storage (SMES) is the important elements of FACTS family. The SSR adopts the analyzing system of frequency scanning—complex torque coefficient, abandons the traditional PID control strategy, and designs the multi-objective control algorithm to realize the system-level control of SMES. It can damp the SSR of power system during its reactive power compensation, which has not only the theoretic meaning but the practical value as well.

**Key words:** sub-synchronous resonance (SSR); superconducting magnetic energy storage (SMES); flexible AC transmission system (FACTS)

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2009)05-0035-04

## 0 引 言

电力系统次同步谐振<sup>[1]</sup> (sub-synchronous resonance SSR) 是由于电力系统中串联入电容补偿的输电系统时, 处于平衡状态下的系统受到扰动后, 电力网络与汽轮发电机组之间可能以系统的一个或数个低于同步频率的自然频率交换数量相当可观的能量, 而产生的一种危害性极大的现象。在次同步谐振状态下, 发电机内会产生次同步的旋转磁场, 它与旋转磁场相互作用, 产生差频振荡转矩, 有可能在机械与电气系统之间发生谐振, 损坏发电机的轴系统。迄今

为止, 已有许多 SSR 抑制措施相继提出, 其中以 FACTS 原件<sup>[2,3]</sup> 尤其引起大家的重视。目前在次同步抑制方面研究最多的 FACTS 元件是串联电容补偿器 (TSCS)<sup>[4]</sup>, 下面以 IEEE 次同步谐振第二标准测试系统, 介绍了一种新的引入超导磁储能装置 (superconducting magnetic energy storage SMES) 进行无功补偿并且同时抑制次同步谐振的方法。

SMES<sup>[5]</sup> 是一种新型的 FACTS 装置, 是一种高效、快速的储能装置, 在电力系统中具有广泛的应用。它利用超导线制成的线圈将交流电网供电励磁所产生的磁场能量储存起来, 在需要时再将储存的磁场能量送回交流电网或用作它用。

# 1 系统模型

## 1.1 待研究系统模型

这里研究的系统为如图 1 所示的 IEEE 第一标准模型,即机械系统轴系由 6 个转子串联而成。它们依次为汽轮机的高压段 (HP)、中压段 (IP)、低压段 A (LPA)、低压段 B (LPB)、发电机 (GEN) 和励磁机 (EXC)。电气系统包括发电机、变压器、输电线路、固定串补电容、SMES 和无限大系统。

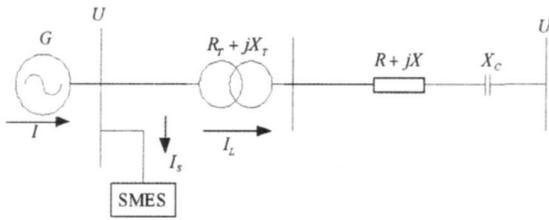


图 1 待研究系统模型

## 1.2 超导储能装置

SMES 装置的基本结构如图 2 所示。由于超导储能线圈是 DC 或准 DC 装置,而其充放电通常又是通过 AC 电网来完成的,因此,就需要一种称为功率调节系统 (power conditioning system, PCS) 的装置来连接 DC 超导线圈和 AC 电网。这里的采用电压源型 PCS 其主要由电压源型变换器和 DC/DC 斩波器构成,如图 2 所示。

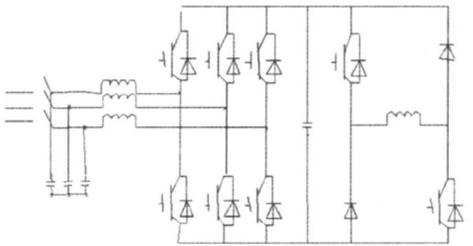


图 2 电压源型 PCS 原理图

配合图 2 中 PCS 的 DC/DC 斩波器对超导线圈电流的斩波,同时调节电压源变换器对 AC 电网输出电压的幅值和相位,就可以实现四象限控制 SMES 装置与 AC 电网之间的有功功率和无功率交换。

# 2 控制设计

设系统为三相基波正序系统,电压有效值为  $V_s$ ,其领先  $V_{SMES}$  相角为  $\delta$  通过分析可以得到,若保持脉宽  $\theta$  不变只调整相位角  $\delta$  则即可改变 SMES 向系统

输入的无功功率,同时电容器电压也将随之改变。

目前 SSR 分析通常采用频域分析法和时域分析法两大类<sup>[6~9]</sup>。通过分析 SSR 系统的线性化模型可以发现,机械部分和电气部分的线性化方程之间,除了通过发电机转子的角度关系式  $\Delta \delta = \Delta \delta_s$  和电磁转矩的关系式  $\Delta T_e = -\Delta T_s$  (质量块 5 为发电机转子,  $\Delta \delta_s, \Delta T_s$  为发电机的转子角度与发电机的电磁转矩) (符号说明) 相互联系外,其他变量之间并无直接联系。再考虑到次同步谐振频率与轴系的自然扭振频率互补,将采用扫频—复转矩<sup>[10,11]</sup>系数辨别法来分析和阻尼次同步谐振。该方法是 Canay 于 1982 年提出的一种用于电力系统次同步谐振的分析方法,其基本思想是:令  $\Delta \delta$  在轴系自然扭振频率附近作等幅振荡,分别求出机械部分和电气部分的转矩对这一振荡的响应,通过在次同步频率范围内对机械和电气复转矩系数进行扫描,根据使得机械和电气弹性系数之和为零的频率下机械和电气阻尼之和的正负来判别  $\Delta \delta$  的振荡是否被阻尼,从而判别系统是否会发生次同步谐振。而且根据扫频—复转矩系数判别法的思想,可以得知只要通过采取适当措施以改变全系统的电气复转矩系数中的电气阻尼系数,使得电气阻尼系数和系统中的机械阻尼系数之和大于零,就可以实现对电力系统次同步谐振的阻尼。

为了使 SMES 具有更好的稳定性和灵活性,采用模糊控制策略通过改变 SMES 的控制角  $\delta_{SMES}$  来实现抑制电力系统次同步谐振的目的。通过分析便可以知道要增大发电机的阻尼必须产生一个类似于  $D \frac{d\Delta \delta_s}{dt}$  的项,设原动机输出功率  $P_m$  不变,那么只有改变发电机电磁功率  $P_e$ , 因为  $\Delta P_e \propto \Delta I_{SMES} \propto \int \delta_{SMES} dt$  因此要  $\Delta P_e \propto \frac{d\Delta \delta_s}{dt}$  则有  $\delta_{SMES} \propto \Delta \dot{\omega}$ , 所以 SMES 的控制角  $\delta_{SMES}$  中加入与  $\Delta \dot{\omega}$  成正比的项才能增大系统的阻尼,抑制次同步谐振。

# 3 控制策略

将 SMES 等效地看成一个相角和幅值均可变的电流源,根据 SMES 并联输出电流的可控性,在 dq 坐标下,可以设计 SMES 并联输出的电流  $I_s$  与发电机定子电流之间满足以下关系。

$$\begin{cases} \dot{i}_d = k_1 i_d \\ \dot{i}_q = k_2 i_q \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $i_d$ 、 $i_q$  为  $I_s$  的 dq 分量;  $k_1$ 、 $k_2$  是控制因子, 通过控制  $k_1$ 、 $k_2$  就可以改变  $i_d$ 、 $i_q$ , 从而控制  $I_s$  的幅值和相角。

对式 (1) 线性化, 并进行拉普拉斯变换为

$$\begin{cases} \Delta \dot{i}_d = \Delta k_1 i_{d0} \\ \Delta \dot{i}_q = \Delta k_2 i_{q0} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Delta \dot{i}_d = \Delta i_d - \Delta k_1 i_{d0} \\ \Delta \dot{i}_q = \Delta i_q - \Delta k_2 i_{q0} \end{cases} \quad (3)$$

对图 1 中的带串联电容补偿的电力系统, 对外电路方程进行 dq 坐标变换及其线性化, 可得

$$\begin{cases} \Delta u_d - \Delta u_{cd} = (R_L + pX_L) \Delta i_d - X_L \Delta i_q - X_L i_{q0} \Delta \omega \\ \Delta u_q - \Delta u_{cq} = (R_L + pX_L) \Delta i_q - X_L \Delta i_d - X_L i_{d0} \Delta \omega \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $R_L = R_r + R_c$ ,  $X_L = X_r + X_c$ 。

对串联电容进行进一步计算, 可得

$$p(u_c - u_s) = X_c i \quad (5)$$

对式 (5), 同样可以进行 dq 变换并线性化, 然后再与线性化后的同步发电机运算电抗形式的磁链方程、电压方程一起代入式 (4), 消去中间变量可得

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{i}_d \\ \Delta \dot{i}_q \end{bmatrix} = Z^{-1} \left( A \Delta \delta + B \begin{bmatrix} \Delta k_1 i_{d0} \\ \Delta k_2 i_{q0} \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

其中,  $Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$ ,  $B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix}$ ,  $A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}$ 。

各矩阵元素的定义为

$$Z_{11} = X_L p^2 + (R_L + R_a) p - X_L + X_c + (p^2 - 1) X_d(p)$$

$$Z_{12} = -2X_L p - (R_L + R_a) - 2pX_q(p)$$

$$Z_{21} = 2X_L p + (R_L + R_a) + 2pX_d(p)$$

$$Z_{22} = X_L p^2 + (R_L + R_a) p - X_L + X_c + (p^2 - 1) X_q(p)$$

$$A_1 = (X_L i_{q0} - \Phi_{q0}) p^2 + (X_L i_{d0} - u_{cd0} - \Phi_{d0}) p - u_{sd0}$$

$$A_2 = (-X_L i_{d0} + \Phi_{d0}) p^2 + (X_L i_{q0} + u_{cd0} - \Phi_{q0}) p - u_{sq0}$$

$$B_{11} = B_{22} = X_L p^2 + R_L p - X_L + X_c$$

$$B_{21} = -B_{12} = 2X_L p + R_L$$

且对于电磁力矩方程进行线性化处理得

$$\Delta T_e = \Phi_{d0} \Delta i_q + i_{q0} \Delta \Phi_d - \Phi_{q0} \Delta i_d - i_{d0} \Delta \Phi_q \quad (7)$$

忽略励磁电压的变化, 将运算电抗形式的磁链方程线性化后代入上式, 可得

$$\Delta T_e = (-i_{q0} X_d(p) - \Phi_{q0}) \Delta i_d + (i_{d0} X_q(p) + \Phi_{d0}) \Delta i_q \quad (8)$$

可以看出, 在含有 SMES 的系统中, 外电路的电流增量  $\Delta i_d$ 、 $\Delta i_q$  均是  $\Delta \delta$  和控制因子  $\Delta k_1$ 、 $\Delta k_2$  的函数, 因此可以通过控制  $\Delta k_1$ 、 $\Delta k_2$  来控制电流增量

$\Delta i_d$ 、 $\Delta i_q$ , 从而使全系统的电气和机械阻尼系数之和大于零, 达到阻尼 SSR 的目的, 控制框图见图 3。

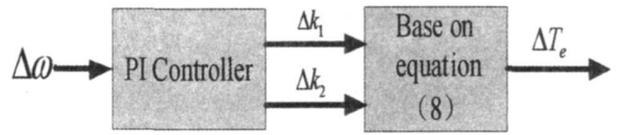


图 3 SEMS 控制策略框图

## 4 MATLAB/SMULINK 仿真

这里研究的 IEEE SSR 第二标准测试系统, 所用的超导磁储能系统 (SMES) 主电路采用电压源型 PCS 的模型结构。

通过仿真实验可以得到, 当系统采用 55% 串联电容补偿时, 发生次同步谐振, 原动机低压段 A 与低压段 B 轴系间的扭矩  $T_3$  以及低压段 B 与发电机轴系间的扭矩  $T_2$  如图 4 所示。

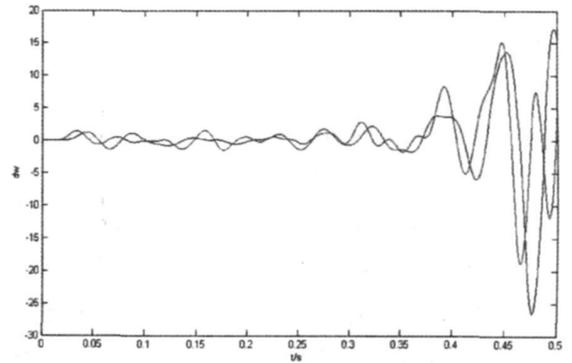


图 4 无 SMES 低压缸 A 和低压缸 B 之间的扭矩 (P.U)

由图 4 可以看出轴系之间的扭矩较大, 且有发散振荡迹象, 说明此时发电机发生了次同步谐振现象, 这正是采用古典串补而引发的问题。

而当系统采用 SMES 方案时系统原动机轴系间的扭矩  $T_2$ 、 $T_3$  如图 5 所示。

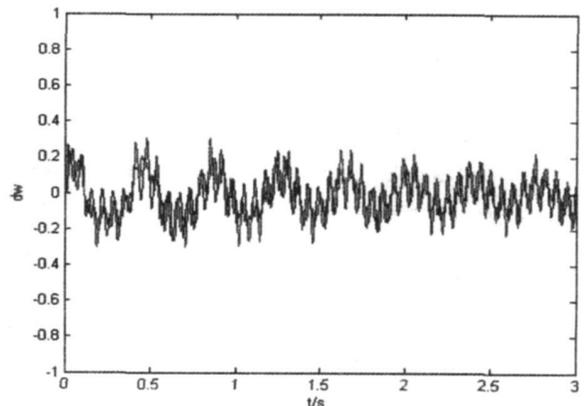


图 5 有 SMES 低压缸 A 和低压缸 B 之间的扭矩 (P.U)

可以清楚地看到,原动机低压段 A 与低压段 B 轴系间的扭矩  $T_3$  以及低压段 B 与发电机轴系间的扭矩  $T_2$  比采用固定串补的情况下明显地减小,并使其振荡波形趋于平缓,这说明系统采用了 SMES 方案后,次同步谐振现象得到了很好的抑制。而且可以同时得到输电线路相电压的标幺值,如图 6 所示。

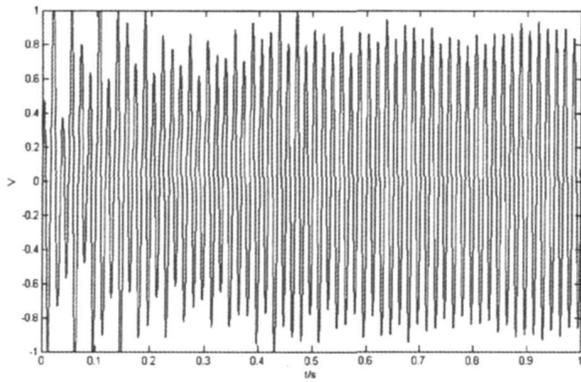


图 6 系统 A 相电压 (P.U)

## 5 结 论

通过以上算例的仿真分析,可以看出采用 SMES 方案进行电力系统的无功补偿,既可以稳定电力系统的电压,提高电压的峰值,而且还可以对电力系统发电机轴系之间的扭振现象有很好的抑制作用,阻尼次同步谐振现象的产生。对于不同的运行工况和需要解决的问题,SEMS 方案的控制策略可以根据需要作一些变化。

综上所述,应用 SEMS 方案,进行电力系统的无功补偿以及次同步谐振的阻尼具有极高的经济实用价值。

## 参考文献

- [1] 钟胜. 与超高压输电线路加串补装置有关的系统问题及其解决方案 [J]. 电网技术, 2004, 28(6): 26-29.
- [2] 赵贺. 电力电子学在电力系统中的应用——灵活交流输电系统 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [3] 何大愚. 柔性交流输电的定义, 机遇及局限性 [J]. 电网技术, 1996, (20): 18-24.
- [4] 曹路, 陈衍. 可控串联补偿抑制次同步谐振的机理 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(4): 25-30.
- [5] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [6] 张文涛. 次同步谐振问题及防止措施 [J]. 电网技术, 1989, (2): 59-65.
- [7] IEEE Committee Report Countermeasures to Sub synchronous Resonance Problems, IEEE Trans on PAS 1980, 99 (5): 1810-1817.
- [8] R. G. Farmer A. L. Svchwalb E. kvate Navajo project report on Sub synchronous Resonance Analysis and Solutions IEEE Trans on PAS, 1977. 1266-1232
- [9] R. F. Wolff Stop Sub synchronous T/G-Shaft Damage, Electrical World 1981, 129-133.
- [10] 李岩松. 基于同意潮流控制器的阻尼次同步谐振的研究 [M]. 北京: 华北电力大学, 2000
- [11] Xing K Kusic G. L Damping subsynchronous resonance by phase shifters IEEE Tran on Energy Conversion 1989, 4(3): 344-350.

### 作者简介:

秦浩庭 (1981-), 男, 西南交通大学在读硕士。

(收稿日期: 2009-05-15)

(上接第 4 页)

- [3] 任震, 黄雯莹, 冉立. 高压直流输电系统可靠性评估 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [4] 陈永进, 任震. 模型组合及其在直流输电系统可靠性评估中的应用 [J]. 电网技术, 2004, 28(13): 18-22.
- [5] Kunuganty S HVDC Transmission System Models for Power System Reliability Evaluation [C]. IEEE WESCANEX '95 Conference proceedings Wescanex 1995, 5: 501-507.
- [6] Billinton R. Aboreshaid S A Hybrid Deterministic/Probabilistic Technique for HVDC System Reliability Evaluation [A]. 1997 Conference on Communications Power and Computing [C]. WESCANEXPII Proceedings Winnipeg MB, 1997, 5: 35-40.
- [7] Billinton R. Fotuhi-Firuzabad M, Faried S O. Reliability

Evaluation of Hybrid Multi-terminal HVDC Substation Systems [J]. IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution 2002, 149(5): 571-577.

- [8] 刘海涛, 程林, 孙元章. 交直流系统可靠性评估 [J]. 电网技术, 2004, 28(23): 27-31.
- [9] 张静伟, 任震, 黄雯莹. 直流输电系统可靠性故障树评估模型及应用 [J]. 电力系统自动化, 2005, 25(6): 62-65.
- [10] 金星, 洪延姬. 工程系统可靠性数值计算方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

### 作者简介:

谢开贵 (1972-), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事电力系统规划与可靠性、电力系统优化运行、电力系统并行计算及电力市场等方向的研究和教学工作。

(收稿日期: 2009-07-09)