

基于 PSCAD 的电力系统次同步谐振研究

邓 婧, 李兴源

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:次同步谐振 (SSR) 问题是由串联补偿输电网络形成的电气谐振回路的固有频率与汽轮发电机组轴系扭振固有频率互补时 (其和等于同步频率) 引起的。主要研究了由串补电容引起的 SSR 的频域分析方法的验证与研究, 用到的两种方法分别是电磁暂态时域仿真法 (PSCAD/EMTDC) 与基于时域仿真实现的复转矩系数法 (测试信号法)。采用的技术路线为两步: 首先在 PSCAD/EMTDC 平台上建立 IEEE 第一标准测试系统模型, 然后在所建模型上, 对所采用的频域分析方法——测试信号法和时域仿真法进行对比与校验。最后对次同步谐振的防治措施及对策做了简要介绍。

关键词:电力系统; 串联补偿; 次同步谐振; 复转矩系数法; 测试信号法; 时域仿真法

Abstract: If the resonant frequency of series compensated transmission network and the natural frequency of turbine-generator shaft complement each other (the sum is equal to synchronous frequency), it may result in subsynchronous resonance (SSR). The verification and research of SSR frequency-domain analysis methods are carried out. The two methods used are electromagnetism transition condition simulation method in the time domain (PSCAD/EMTDC) and the complex torque coefficient method realized by time-domain simulation based on PSCAD/EMTDC (the test signal method), respectively. The mitigation measures of SSR are introduced in the end.

Key words: power system; series compensation; subsynchronous resonance; complex torque coefficient approach; test signal method; time-domain simulation method

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0020-04

中国的能源结构有着负荷中心远离电源中心的特点, 大容量、远距离输电是中国电力工业发展的客观需求, 然而提高远距离、重载、跨区间交流输电系统的传输容量又通常受到其暂稳极限的限制。串联补偿技术是一种提高稳定极限的经济有效的手段, 在输电线中间加入串联电容器, 能减小线路电抗, 缩小线路两端的相角差, 从而获得较高的稳定裕度并传输较大的功率。串补输电技术从 19 世纪 20 年代末便开始应用^[1~3]。串补输电网络 (包括发电机、变压器、线路、串联电容器等部件) 将形成一个电气谐振回路, 如果这一电气谐振回路的固有频率与汽轮发电机组轴系扭振固有频率互补时 (其和等于同步频率), 就会因网机耦合而彼此互激, 发生次同步谐振^[1] (Subsynchronous Resonance 缩写为 SSR) 问题。中国正处在电力发展的高峰期, 大容量、远距离串补输电在不断建设当中, 能否避免串补电容所带来的次同步谐振问题, 最大限度的提高线路功率传输能力, 将直接

关系到中国电力系统运行的安全性、稳定性和经济性问题。所以这里所进行的电力系统次同步谐振分析和相关抑制措施的研究便具有重要的理论意义和实用价值。

首先阐述了次同步谐振产生的机理, 然后通过串补度及线路电阻的变化对所采用的测试信号法与时域仿真法进行对比与校验, 最后对次同步谐振的防治措施及对策做了简要介绍。

1 次同步谐振的产生机理

电气系统与轴系机械系统是相互作用的。电气系统通过电磁力矩影响机械系统, 机械系统则通过发电机转子的角位移和角速度影响电气系统。频率为 ω_e 的定子谐振电流将产生转速为 ω_e 的旋转磁场, 这一磁场相对于发电机转子的转速为 $\xi = \omega - \omega_e$ (ω 为转子的转速)。也就是说, 将产生频率为 ξ 的电磁力矩。如果此时汽轮发电机转子轴系的一个自然扭振频率 ω_m 等于 ξ 则上述电磁力矩将激起频率为 ω_m 的

基金项目: 国家重点基础研究专项经费项目 (2004CB217901); 国家科技支撑计划项目 (2008BAA13B01); 国家电网公司项目

扭振;后者又将在发电机定子中感应出频率为 ω_e 的电压、电流和电磁力矩。这时,如果系统的阻尼不够大,就会发生电气系统与机械系统振荡的相互助增现象。在这种情况下,发电机电磁力矩和轴系的扭矩将不断增长,这就是通常所说的次同步谐振现象。可见,当电气系统的谐振频率与轴系的某一自然扭振频率“互补”时,有可能发生次同步谐振,用公式表示为

$$\omega_e + \omega_m = \omega_0 = 1 \quad (1)$$

一般地讲,如果超高压输电网络中有多处装有串联电容补偿装置,而汽轮发电机组又由多个转子串接而成,则电气系统中就会有若干个次同步频率,而机械系统中就会有若干个自然扭振频率。只要前者中有一个频率与后者中的一个频率“互补”,就可能发生次同步谐振。

2 次同步谐振的特性规律

电力系统次同步谐振有多种分析方法,如扫频法、特征值分析法、复转矩系数法^[4,5,6]、时域仿真法等^[7,8]。在本章中,将结合单机串补输电工程实例,采用基于 PSCAD/EMTDC 时域仿真实现的复转矩系数法——测试信号法,以及时域仿真法,通过不同运行条件下的单机系统的次同步谐振特性分析,来研究单机串补输电系统 SSR 问题的一些具有实际意义的规律。

测试信号法和时域仿真分析法均可方便地分析含有串联补偿电容的输电系统可能引起的电力系统 SSR 问题,并且这两种方法具有各自的特点,故而采用这两种分析方法可以进行有效的相互验证和有益的补充。

采用测试信号法计算图 1 的电气阻尼系数的过程如下。

(1) 在所研究的发电机转子上施加一串与 0.5 Hz 成整数倍的小值脉动转矩,频率范围从 5~59.5 Hz 可得施加小值脉动转矩后发电机总的机械转矩;

(2) 施加脉动转矩后,仿真 30 s 截取公共周期 2 s 上的发电机电磁转矩 T_e 和发电机角频率增量 $\Delta\omega$;

(3) 将上述两个量进行 Fourier 分解,得出不同频率下的 ΔT_e 和 $\Delta\omega$;

(4) 根据 $\frac{\Delta T_e}{\Delta\omega} = K_D(\lambda) - j\frac{1}{\lambda} K_S(\lambda)$, 求出 $\frac{\Delta T_e}{\Delta\omega}$;

(5) 根据 $D_e(\lambda) = \text{Re}(\frac{\Delta T_e}{\Delta\omega})$, 求出电气阻尼系数

$D_e(f)$;

(6) 由文献 [13] 查得的机械模态参数和计算得到的电气阻尼系数 $D_e(f)$, 判断轴系扭振的稳定性。

采用时域仿真分析法的实现过程如下:当系统进入稳态后,在靠近电容器母线处 2 s 时加一三相短路故障,仿真时间为 7 s 通过仿真计算结果观测轴系扭矩量的变化,以确定系统在故障条件下是否会激发发电机组轴系扭振转矩不稳定。

3 系统模型及参数

在 PSCAD/EMTDC 平台上建立 IEEE 第一标准测试系统模型,进行测试信号法频域分析和时域仿真法的分析。

通过改变串补度及电阻的值先用测试信号法得出分析结果,再用时域仿真法进行验证。被测试的系统结构如图 1 所示。

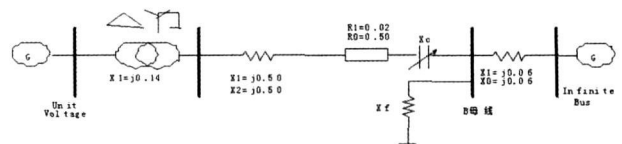


图 1 IEEE 第一标准系统模型

取基准容量 $S_B = S_{rated} = 892.4 \text{ MVA}$, $V_B = 500 \text{ kV}$, $f_{rated} = 60 \text{ Hz}$, $p = 1$ 。

计算分析时设定条件如下:机组功率因数 0.9, 机组励磁调节和调速系统简化考虑为恒定输出。

首先对图 1 中网络部分参数进行转化,把标么值转化成有名值。潮流计算时发电机可作为 PQ 节点处理,相应的有功和无功分别为

$$P_G = 892.4 \times 0.9 = 803.16 \text{ (MW)}$$

$$Q_G = 892.4 \times \sqrt{1 - 0.9^2} = 389.0 \text{ (Mvar)}$$

网络中的其余参数都归算到 500 kV 侧,500 kV 侧的基准阻抗为

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B} = 500 \times 500 / 892.4 = 280.14 \text{ (ohm)}$$

因此,在图 1 中,从左至右的各阻抗的有名值分别为

$$X_1 = \frac{10^3 \times 0.5 \times 280.14}{2\pi \times 60} = 371.55 \text{ (mH)}$$

$$X_2 = 0.02 \times 280.14 = 5.603 \text{ (ohm)}$$

$$X_C = \frac{10^6}{2\pi \times 60 \times 0.371 \times 280.14} = 25.52 \text{ (uF)}$$

$$X_s = \frac{0.06 \times 280.14 \times 10^3}{2\pi \times 60} = 44.6 (\text{mH})$$

$$X_f = \frac{10^3 \times 0.04 \times 280.14}{2\pi \times 60} = 29.7 (\text{mH})$$

机组的轴系采用 6 段集中质量模型见图 2。

HP、IP、LPA、LPB——汽轮机的高压段、中压段、
低压段 A、低压段 B；
GEN——发电机；
EXC——励磁机。

汽轮机

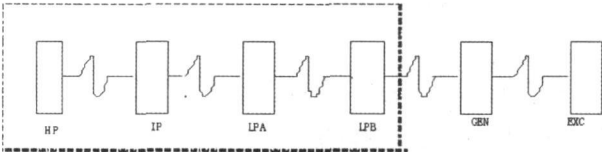


图 2 汽轮发电机组六质块弹性轴系模型

4 串补度对次同步谐振影响分析研究

4.1 测试信号法的分析结果

对于每种串补度，都在其运行条件下，待系统进入稳态后，在机组的机械转矩上注入脉动转矩，仿真得到发电机电磁转矩和转子角速度，然后取出发机电磁转矩与转子角速度这两个量的时域仿真结果进行傅立叶分析，将时域结果变换为频域相量，可得各个方式下的电气阻尼系数计算结果。这里主要考虑 3 种串补度的变化。

- (1) $X_c = 0.3 \text{ pu}$ 串补度为 60%；
- (2) $X_c = 0.371 \text{ pu}$ 串补度为 74.2%；
- (3) $X_c = 0.4 \text{ pu}$ 串补度为 80%。

分别计算以上 3 种情况下的电气阻尼系数，综合如图 3 所示。由图 3 可以看出，串补度越高，电气谐振的频率越低（折算到转子侧），而对应电气谐振点的负阻尼越大。

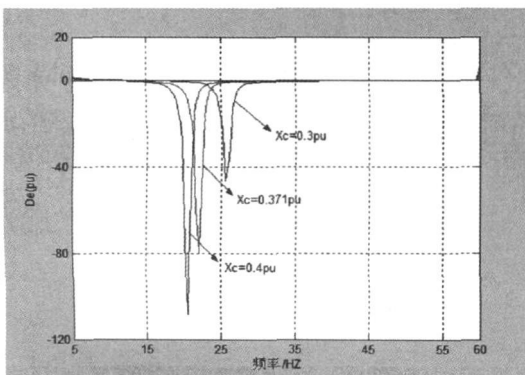


图 3 串补度变化对电气阻尼系数的影响

方式一的频域分析结果表明，在发电机的自然扭振频率 25.55 Hz 附近有明显的电气负阻尼，由此可以判定，该运行方式下系统有次同步谐振的危险。

方式二的频域分析结果表明，在发电机的自然扭振频率 20.21 Hz 附近有明显的电气负阻尼，由此可以判定，该运行方式下系统有次同步谐振的危险。

方式三的频域分析结果表明，在发电机的自然扭振频率 20.21 Hz 附近有明显的电气负阻尼，由此可以判定，该运行方式下系统有次同步谐振的危险。

4.2 时域仿真结果

用 PSCAD 软件进行仿真得出结果如图 4、图 5、图 6 所示。

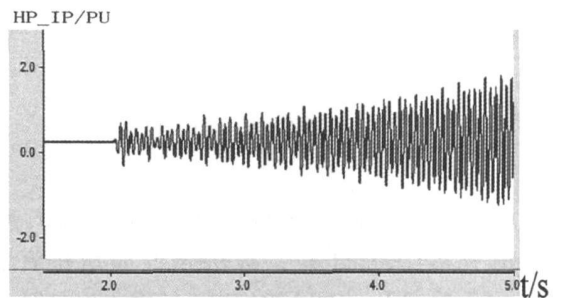


图 4 串补度为 60% 时高压缸与中压缸之间的扭振转矩

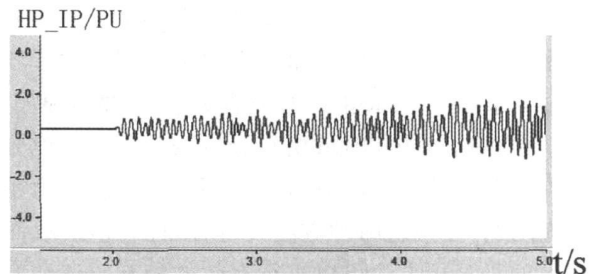


图 5 串补度为 74.2% 时高压缸与中压缸之间的扭振转矩

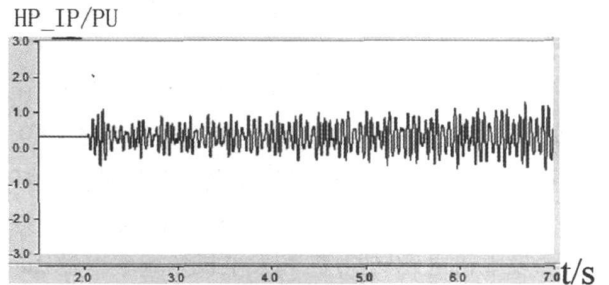


图 6 串补度为 80% 时高压缸与中压缸之间的扭振转矩

从以上 3 种方式的时域仿真结果表明，系统扰动激发了汽轮机组的轴系扭振后，各质块之间的扭矩均呈缓慢增大趋势。由此可以确定，在这 3 种运行方式下系统故障可能会引起机组轴系扭矩的放大现象。

结果与频域仿真得出的结果相同。

5 线路电阻对次同步谐振影响的分析研究

5.1 测试信号法的分析结果

研究方法方法与串补度变化的方法相同。

本节考虑以下 3 种运行方式。

(1) $R_c = 0.01 \text{ pu}$

(2) $R_c = 0.02 \text{ pu}$

(3) $R_c = 0.04 \text{ pu}$

分别计算以上 3 种情况下的电气阻尼系数, 综合如图 7 所示。由图 7 可以看出输电线路的电阻变化不改变电气谐振的频率, 但对电气阻尼系数有很大的影响, 电阻越大, 电气谐振点的负阻尼越小。

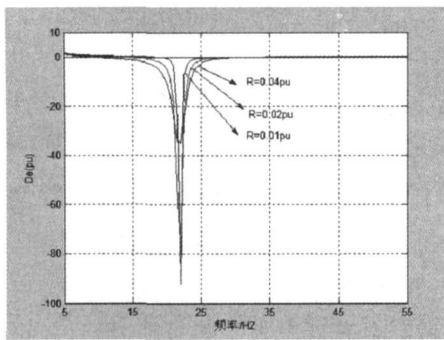


图 7 输电线路电阻变化对电气阻尼系数的影响

方式一的频域分析结果表明, 在发电机的自然扭振频率 20.21 Hz 附近有明显的电气负阻尼, 由此可以判定, 该运行方式下系统有次同步谐振的危险。

方式二的频域分析结果表明, 在发电机的自然扭振频率 20.21 Hz 附近有明显的电气负阻尼, 由此可以判定, 该运行方式下系统有次同步谐振的危险。

方式三的频域分析结果表明, 在发电机的自然扭振频率 20.21 Hz 附近有明显的电气负阻尼, 由此可以判定, 该运行方式下系统有次同步谐振的危险。

5.2 时域仿真结果

研究方法方法与串补度变化的方法相同。得出结果如图 8、图 9、图 10 所示。

这 3 种方式的时域仿真结果表明, 系统扰动激发了汽轮机组的轴系扭振后, 各质块之间的扭矩均呈缓慢增大趋势。由此可以确定, 在这 3 种运行方式下系统故障可能会引起机组轴系扭矩的放大现象。结果与频域仿真得出的结果相同。

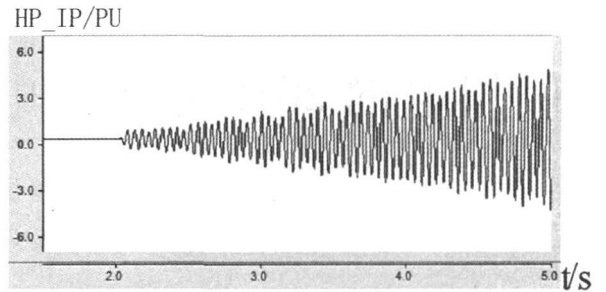


图 8 $R_c = 0.01 \text{ pu}$ 时高压缸与中压缸之间的扭振转矩

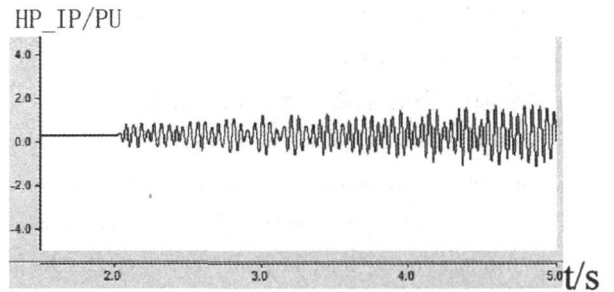


图 9 $R_c = 0.02 \text{ pu}$ 时高压缸与中压缸之间的扭振转矩

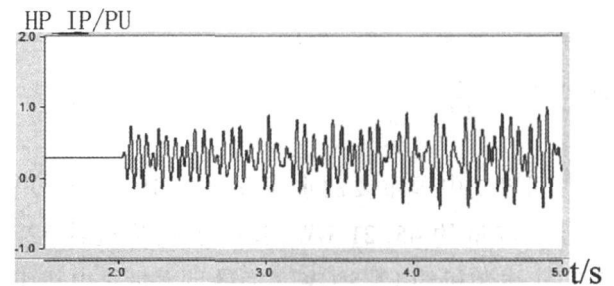


图 10 $R_c = 0.04 \text{ pu}$ 时高压缸与中压缸之间的扭振转矩

6 次同步谐振预防措施

防止次同步谐振的主要措施分为两大类^[9~12]: 一类是通过附加或改造一次设备防止次同步谐振的发生。

另一大类抑制对策是通过二次设备 (即控制装置) 来抑制 SSR。

7 研究展望

将串补输电系统的次同步谐振 (SSR) 问题作为研究重点, 对单机系统 SSR 问题的分析方法和规律特性进行了研究, 并对 SSR 的防治与抑制措施进行了简要介绍。结合实际串补输电工程, 分别采用基于

(下转第 76 页)

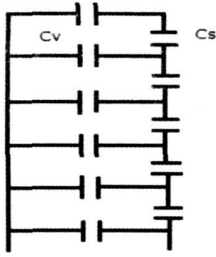


图 2 套管等值电路

套内表面凹凸不平)等因素,因此要严格把守质量关,运用现行的技术监督手段及时发现并处理设备缺陷,避免设备故障,严禁有缺陷的产品进入使用环节。当然为了减少此类故障的发生,除了要保证设计及制造工艺质量外,必须还要做到以下几点:①在进行安装时,套管内部的导线一定要拉直,并且缠绕白布以防止裸线与导电杆相碰导致发热;②加强巡视,要注意油位的变化,是否有油污、渗油、漏油情况,特别是当套管油标管脏污看不清油位时,一定要设法弄清油位;③检修时一定要彻底,发现问题要及时处理,消除隐患。要定期进行介损试验,对于相对体积较小的变压器套管来说,介损测试是行之有效的试验,不仅能反映套管绝缘的全面情况,还可以反映其中的集中性

缺陷。电容式套管介损的现场测试必须注意套管表面泄漏电流的影响。建议在晴朗干燥的条件下进行测试,湿度低于 80%,最好能在低于 65%以下进行测试。测试的套管介损值应与历次测量值(包括试验条件)相比较,尽量排除现场的干扰,以准确地判断套管的绝缘状况。

只有保证套管的设计合理、质量合格、安装正确、运行维护到位、检修彻底,才能切实减少变压器套管故障的发生,同时确保套管的安全运行,才能保证电力变压器的安全性能,使电网正常运行。

参考文献

- [1] 陈涵林,尹章圣. 变压器套管电晕放电及其处理方法 [J]. 安徽电力职工大学学报, 2003, 8(3): 45-47.
- [2] 付东丰,李建明,戴玉松. 变压器绕组变形事故分析事例 [J]. 四川电力技术, 2008, 31(3): 26-27.
- [3] 聂鸿宇,刘睿. 变压器套管末屏接地不良对局部放电测试的影响 [J]. 四川电力技术, 2008, 31(1): 41-42.
- [4] 沈福君,温志勇. 变压器套管检修与维护 [J]. 鸡西大学学报, 2007, 7(2): 50-51.

(收稿日期: 2009-02-21)

(上接第 23 页)

PSCAD/EMTDC 时域仿真实现的复转矩系数法一测试信号法与时域仿真法,分析总结了单机系统的 SSR 特性规律。通过串补度、线路电阻这两个运行条件的变化来分析了单机系统的次同步谐振特性,研究得知这两个运行条件的变化均对系统的 SSR 问题有着不同程度的影响,并结合图表对这些有价值的规律和特性进行了分析和总结,在实际的单机串补输电工程的 SSR 问题分析中要对这些运行条件进行综合考虑;但只通过串补度及线路电阻的变化来研究了对 SSR 的影响,其他方式的改变对 SSR 的影响还有待进一步的研究。

参考文献

- [1] P. M. Anderson, R. G. Farmer. Series Compensation of Power Systems. California USA; PBLSH. Inc 1996.
- [2] Jancke Gunnar and K. F. kerstm. Developments and Experience with Series Capacitors in Sweden. AIEE Trans, v. 71, p. 12, Dec. 1952; 1118-1123.
- [3] Maneatis J. A., E. J. Hubacher W. N. Rothenbuhler and J. Sabath. 500kV Series Capacitor Installations in California. IEEE Trans on PAS 1970, PAS-89, 1138-1149.
- [4] Canay IM. A Novel Approach to the Torsional Interaction and Electrical Damping of the Synchronous Machine (Part I): Theory. IEEE Trans on PAS 1982, PAS-101(10): 3630-3638.
- [5] Canay IM. A Novel Approach to the Torsional Interaction

- and Electrical damping of the Synchronous Machine (Part II): Application to an Arbitrary Network. IEEE Trans on PAS 1982, PAS-101(10): 3638-3647.
- [6] 徐政. 复转矩系数法的适用性分析及其时域仿真实现 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 1-4.
- [7] 陈陈,杨煜. 几种次同步振荡分析方法和工具的阐述 [J]. 电网技术, 1998, 22(8): 10-13.
- [8] 徐政,罗惠群,祝瑞金. 电力系统次同步振荡问题的分析方法概述 [J]. 电网技术, 1999, 23(6): 36-39.
- [9] R. G. Farmer A. L. Schwab E. Katz. Navajo Project Report on Subsynchronous Resonance Analysis and Solution. IEEE Trans on PAS 1977, PAS-96(4): 1226-1232.
- [10] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Countermeasures to Subsynchronous Resonance Problems. IEEE Trans PAS 1980, PAS-99(5): 1810-1818.
- [11] 李录平,袁启昌,韩守木. 汽轮发电机组轴系扭振的原因和对策分析 [J]. 汽轮机技术, 1989, 31(3): 5-9.
- [12] 陈珩. 关于汽轮发电机组轴系扭振的研究工作 [J]. 东南大学学报, 1992, 22(4): 97-107.
- [13] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析.

作者简介:

邓婧(1985-),女,硕士研究生,主要研究方向电力系统稳定与控制;

李兴源(1945-),男,教授,博士生导师,中国电机工程学会理事,IEEE 高级会员,从事电力系统稳定与控制等方面的研究工作。

(收稿日期: 2009-04-30)