

# 频率扫描法分析南方电网串补工程引起的次同步谐振可能性

李伟<sup>1</sup>, 李兴源<sup>1</sup>, 洪潮<sup>2</sup>, 杨煜<sup>2</sup>, 徐大鹏<sup>1</sup>, 艾飞<sup>1</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 中国南方电网技术研究中心, 广东 广州 510620)

**摘要:** 针对南方电网串补工程引发的次同步谐振的可能性进行了分析研究。研究表明除百色串补工程外, 平果和河池串补工程可以不考虑其对次同步谐振的影响, 且百色串补中的马百线对待研机组的影响可以不予考虑。并用频率扫描法分别分析了百色串补线路在不同串补度下的谐振问题, 说明了长距离输电系统在高串补度下容易引起次同步谐振。

**关键词:** 南方电网; 次同步谐振; 频率扫描; 串联补偿

**Abstract:** The SSR (subsynchronous resonance) possibility caused by series-capacitor compensation project in China Southern Power Grid is analyzed. The result shows that the series-capacitor compensation projects in Pingguo and Hechi do not cause the SSR except the series-capacitor compensation project in Baise, and it has no effect on the series-capacitor compensation of Mabai. The frequency scanning method is used to analyze the series-capacitor compensation of Baise in different compensation degrees, and the result shows that the long-distance transmission system with high series-capacitor compensation will cause SSR easily.

**Key words:** China Southern Power Grid; subsynchronous resonance; frequency scanning; series-capacitor compensation

中图分类号: TM712 文献标识码: B 文章编号: 1003-6954(2008)03-0001-03

串联补偿工程相对传统的输变电工程具有耕地占用少、工程量小、运行简便等优点。目前, 串联补偿作为提高线路输电能力的手段在中国的电网规划中越来越受到各方的关注。南方电网所处的贵州、云南、广西省(区)多为山区, 输电走廊的建设需花费大量的人力物力, 并且新的输电走廊的增加将变得越来越困难。因此, 在南方电网采用串联补偿技术以提高电网的输送容量是非常切合本地区实际的。到2010年, 南方电网的网架上将会出现百色、平果和河池三处串补装置, 电压等级均为500 kV, 如图1所示。同时采用串联补偿等新技术, 用来缩短输电线路的电气距离, 提高电力网络的功率传输能力, 经济效益十分可观<sup>[1~2]</sup>, 但串补可能会引起次同步谐振现象<sup>[3]</sup>。因此, 分析由串联补偿引起的SSR的可能性也是非常必要的。

电力系统次同步振荡问题的研究方法主要有特征值分析法, 频域分析法以及时域仿真法等, 它们都可以用于分析由串联电容补偿引起的次同步谐振问题<sup>[4~11]</sup>。

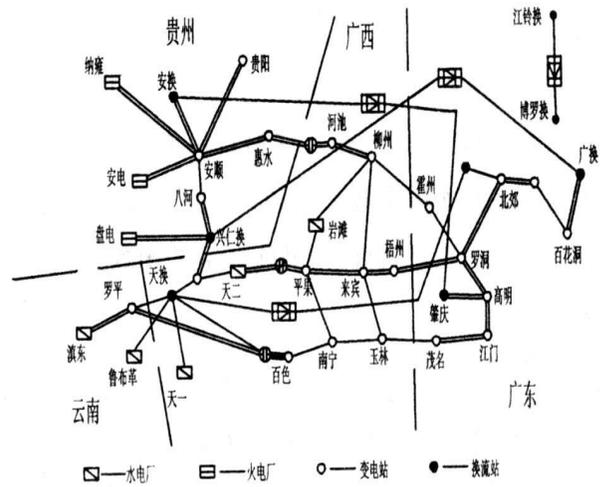


图1 2010年南方电网网架图

1) 严格的SSR分析方法(特征值分析法<sup>[5]</sup>), 需要列出全系统的状态方程  $\dot{X} = AX$ , 然后对系数矩阵  $A$  计算特征值、特征向量、特征值和状态变量的相关因子等。该方法可以计算SSO的准确振频、衰减因子、模态分布、特征根灵敏度等, 理论严格, 可以得到大量的有用信息, 分析准确度高。但是有如下缺点: 系统的状态方程形成较为困难, 且有“维数灾”问题, 故只

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(505954128-50577044); 国家科技支撑计划项目(2008BAA13B01); 中国南方电网公司博士后研究项目。

能计算小系统,同时还要求有准确的轴系参数,否则无法计算。此外该方法只能得到若干孤立频率点的电气阻尼特性,而不能得到电气阻尼随扰动频率变化的曲线,因而不利于抑制对策的确定。

2)频域分析法有两种:频率扫描法和复转矩系数法。复转矩系数法<sup>[6~7]</sup>主要用于机电扭振互作用及装置引起的SSO问题的分析。通过计算待研发发电机电磁力矩增量 $\Delta T_e$ 与发电机质块的转子角增量 $\Delta \delta$ 在各扰动频率 $\omega$  ( $\omega \in (0, 2\pi f_0)$ ,  $f_0 = 50$  Hz)下的复数相量之比,即

$$\frac{\Delta T_e}{\Delta \delta} = K(\omega) + j\omega D(\omega)$$

获得机组视在阻尼力矩系数曲线 $D-\omega$ ,若在待研发发电机的某轴系扭振自然频率 $\omega_n$ 处

$$S(\omega_n) + D^{(m)} < 0$$

则该发电机在此扭振自然频率下将发生扭振不稳定。上式中 $D^{(m)}$ 为该发电机轴系解耦模型中与此自然扭振频率相对应的机械阻尼系数,且 $D^{(m)} > 0$ 。该方法相对于特征根分析法有一定的优越性;可以获得阻尼系数随扰动频率变化的曲线,有利于采取对策等。但是对每台待研的发电机都要做 $D-\omega$ 曲线,且每个频率处都要做大量计算,故多机系统时工作量相当大。

3)频率扫描法<sup>[8~9]</sup>是一种近似的线性方法。在待研发发电机端口处,注入三相对称单位电流 $I(j\omega)$ ,电流频率在次同步频率范围内连续变化。于是可以得到系统的正序阻抗,该阻抗是 $\omega$ 的函数:

$$Z(j\omega) = \frac{U(j\omega)}{I(j\omega)} = R_{sys}(\omega) + jX_{sys}(\omega)$$

从 $X_{sys}(\omega)$ 中找出 $X$ 为0的频率点,即为系统的谐振点,若这些谐振点处对应的 $R_{sys}(\omega) < 0$ ,则发电机轴系就有可能发生自激振荡。该方法只需计算以被研究机组为端口的全电气系统阻抗的频率响应特性,从中确定电气系统的谐振频率,并判断其是否与轴系的扭振固有频率互补(二者之和等于同步频率),若发生互补,则说明当系统阻尼不足时会产生SSR。这种方法计算量小,可以利用现有的电磁暂态程序如EMTP、PSCAD/EMTDC等进行计算,适用于大系统,计算速度快,物理透明度高。在工程中判断具有串联补偿的电力系统是否发生次同步同步谐振,该方法最为常用<sup>[10, 11, 12]</sup>。

## 1 待研串补、机组的选择及机组模型

含有串联补偿的线路具有发生次同步谐振的可能性,特别是大型汽轮发电机组经较高串联电容补偿的线路接入系统时,在某种运行方式与补偿度的情况下,有可能在机械与电气系统之间发生谐振,并产生极为严重的后果<sup>[13]</sup>。

平果串补通过输电线路与天生桥水电厂相连,而本文次同步谐振主要考核与串补相邻(或接近)的火电机组,而不去研究水电机组的次同步频率响应,这主要是因为:(1)相对于涡轮推进器和励磁机转子惯性大得多的水轮发电机转子惯性有效地保护了转子的机械系统,很难通过对发电机进行干扰来激发扭振;(2)水轮机粘性水轮阻尼作用使得水轮机对扭振的阻尼作用远高于汽轮机。河池串补要经过多个变电站才能与大型火电机组相连,且距离较远。百色串补仅经过罗平变电站就可与大型火电机组相连且距离较近。因此,本文选择百色串补为研究对象。

已知的和潜在的次同步谐振问题皆与通过串联补偿输电线路与负荷中心相联并远离负荷中心的汽轮发电机组相关,需要进行次同步谐振研究的汽轮发电机组应满足以下条件:与串联补偿装置距离较近,且该汽轮发电机组与交流大电网联系薄弱,该汽轮发电机组的额定功率与输送的额定功率在同一个数量级上。理论分析和实际经验表明,次同步谐振基本上只涉及大容量汽轮发电机组,对30万kW以上汽轮发电机组应特别加以注意,这是由大容量汽轮发电机组的轴系结构特点造成的。在南方电网中,与百色串联补偿装置距离较近的且容量较大的机组是滇东电厂。因此选用滇东电厂机组为待研机组。

滇东电厂安装有四台600MW机组,发电机轴系数据如表1所示。

## 2 系统频率扫描

使用PSCAD/EMTDC仿真程序,系统的等值电路如图2所示,滇东电厂通过两回线路与罗平变电站相连,罗平变电站通过两回线路连接到百色串补,天生桥换流站通过一回线路连接到百色串补,百色变电站直接连接到广西、广东电网。

表1 滇东电厂发电机组轴系数据

分类	单位	数量
转子轴系质块个数	个	4
各质块的转动惯量	kg·m <sup>2</sup>	2 872, 21 570,
		21 917, 9 874
相邻质块间的扭动刚度	N·m/rad	8.473 3E+07,
		1.114 6E+08,
稳态时汽轮机各段 承担总功率百分比		1.497 0E+08
		53%, 23.5%,
		23.5%
自然扭振频率	Hz	13.6, 25.6, 30.7

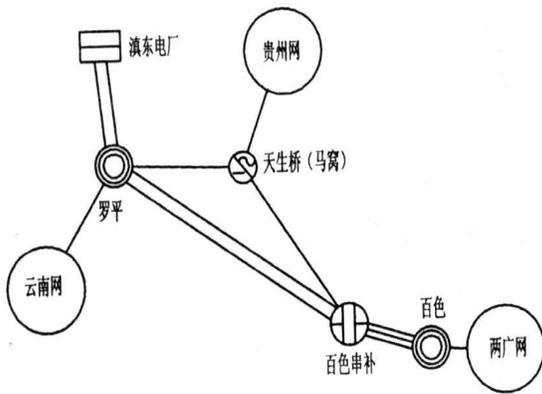


图2 简化系统图

在滇东电厂某典型运行方式下,使罗百线串补度为零,只保留马百线串补,得到的系统阻抗频率响应如图3所示。

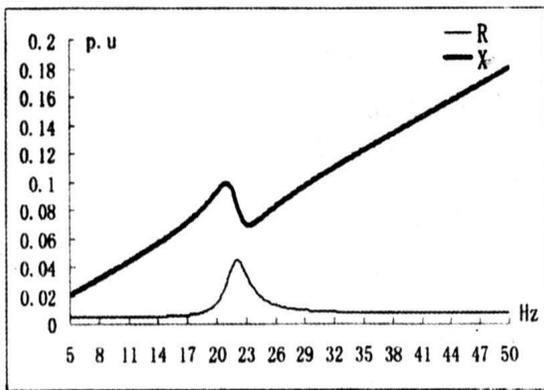


图3 不考虑马百线串补时滇东电厂的扫频图

由图3中可以看出,在次同步频率范围内,由滇东电厂机组看过去的SSR等值电抗一直为正,不会

发生次同步谐振现象,因此说明马百线串补对滇东电厂异步发电机效应的影响可以不予考虑。

保留马百线串补,罗百线串补度为50%时,系统阻抗频率响应如图4所示。

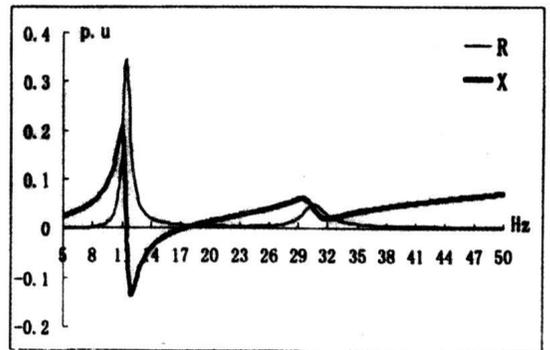


图4 罗百线串补度为50%时滇东电厂的扫频图

由图4中可以看出电抗过零的第一个频率点实际上是并联谐振点,不会产生SSR问题。需要分析的是第二个电抗过零频率点,该频率在17~18Hz的范围内,此频率下电气系统发生谐振,但此时的电阻值为正且与轴系频率并不互补,所以当罗百线串补度为50%时系统不会发生SSR现象。

保留马百线串补,罗百线串补度为60%时,系统阻抗频率响应如图5所示。

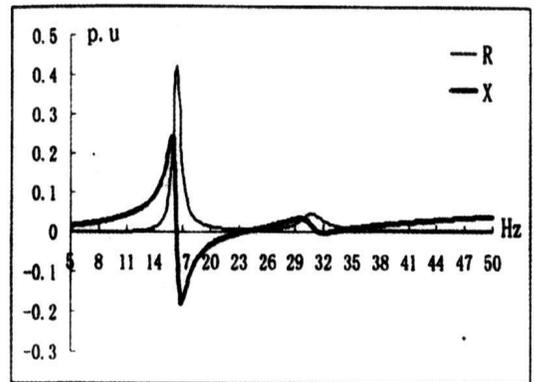


图5 罗百线串补度为60%时滇东电厂的扫频图

如图5所示,第二个谐振点为24.4 Hz左右,与机组轴系中的25.6 Hz互补,该点处的电阻为微小正值,因此该串补度下在该频率点系统有发生次同步谐振的可能。

实际系统的运行方式是多种多样的,上述分析只针对某种运行方式进行,但实际上通过(下转第56页)

阻作为温度传感器,并通过分压电阻实现,如图1所示。分压电阻的阻值可根据参数计算。BQ2057将该电压与内部的 $V(TS1)$ 和 $V(TS2)$ 门限电压比较以决定是否允许充电。

### 3 实验结果

实验时 $R=60\ \Omega$ 选取稳压二极管的稳压值为20V。实验结果表明。原方电流在 $0\sim 900\text{ A}$ 范围内变化时,电源能够提供所需的电压,在原方电流小于20A时,起用充电电池供电,补偿线圈能够使整流侧输出电压维持在25V以下,保证各稳压模块可靠工作。当原方电流大于900A时,整流侧输出电压缓慢上升,超过DC/DC模块的最大输入电压,采取一定的散热措施(如增大散热片的尺寸等)可以使电源在更大范围内工作。

表1 线路电流与输出电压的关系

名称	数值					
线路电流(A)	0	4	30	150	750	900
整流输出(V)	0	1.8	3.5	9.1	17.8	23.1
DC/DC输出(V)	5	5	5	5	5	5.2

### 4 总结

采用充电电池和补偿线圈相结合的方法解决了小电流的死区问题,同时在大电流时可以降低原方电流的激磁作用,可有效地降低了原方电流对电子式互

感器工作电源工作特性的影响。实验结果证明该方法是切实可行的,它解决了在线路电流过低或断路器跳闸时无法供电的问题,同时它能使电源在宽动态范围内满足电子电流互感器对工作电源的长期工作要求。是目前解决有源电子电流互感器高压侧电源问题的有效方案。

### 参考文献

- [1] 徐雁,朱明均,郭晓华,张庆,叶妙元.空心线圈作为保护作用电流互感器的理论分析和实验[J].电子系统自动化,2002,26(16):52-55.
- [2] 钱政.有源电子式电流互感器中高压侧电路的供能方法[J].高压电器,2004,40(2):135-138.
- [3] 聂一雄,尹项根,李伟,等.有源光电式互感器工作电源设计[J].电力自动化设备,2003,23(12):49-51.
- [4] 付烈,郑绳植.光电混合式电流互感器电源的研究[J].现代电子技术,2004,4(18):10-11.
- [5] 刘忠战.电子式电流互感器高压侧自励源供能方法研究[J].高压电器,2006,42(1):55-57.
- [6] 胡彬,周有庆,钟选书,吴贵清,彭红海.电子式电流互感器高压侧电源的研究与实现[J].电气应用,2006,25(5):99-102.

### 作者简介

郭吉伟:男,1981年,硕士,主要研究方向为电力电子技术  
在电力系统中的应用。

梁魁:男,1982年,硕士,主要研究方向为电力系统故障诊断。

懂凌凯:男,1983年,硕士,主要研究方向为电力系统信息及其自动化技术。

(收稿日期:2008-02-26)

(上接第3页)对多种运行方式的分析计算表明,频率扫描分析结果对运行方式的改变是不敏感的<sup>[14]</sup>。

### 3 结论

由以上分析可知:

(1)马百线串补单独作用时不会引起系统的次同步谐振现象。

(2)罗百线串补度为50%时,滇东电厂机组不会发生异步发电机效应。

(3)罗百线串补度为60%时,线路有一电气谐振点,滇东电厂机组有可能发生异步发电机效应,导致

系统发生次同步谐振。

### 参考文献

- [1] 南方电网电力工业“十一五”发展规划及2020年远景目标研究[R].北京:中国电力工程顾问集团公司,2004.
- [2] 李炜,佟名东,张琳等.“十一五”南方电网“西电东送”输电能力研究[J].中国电力,2007,40(2):26-30.
- [3] IEEE Committee Report. Terms, Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations, IEEE Trans. On PAS, 1985, PAS-104(6):1326-1334.
- [4] 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.
- [5] M.R.Iravani, Abdel-Aty Edris. (下转第62页)

### 3 数字式光电互感器的优点

2006年11月在西昌局500kV普提变电站投运的西门子公司生产的500kV串补装置中的TA亦采用了光电互感器,解决了在超高压系统中互感器体积庞大、绝缘困难等难题,同时西门子公司还利用光电互感器对MOV的触发回路提供能量。这些新设备、新技术的应用开创了四川电网二次系统的一个崭新的应用领域。经过光电互感器的安装及运行,体会到光电互感器相对与传统电磁式互感器具有以下优点:

1)光电互感器具有无磁饱和、频率响应范围宽、精度高、暂态特性好等优点,由于信号传送实现了数字化,有利于新型保护原理的实现及提高保护性能,也有利于对电网智能监控。2)采集器处于和被测量电压等电位的密闭屏蔽的传感头部件中,采集器和合并器通过光纤相连,数字信号在光缆中传输,增强了抗EMI性能,数据可靠性大大提高。并彻底解决了电流互感器的过负荷和TV二次回路的压降问题。

3)光电互感器通过光纤连接互感器的高低电压部分,绝缘结构大为简单。以绝缘脂替代了传统互感器的油或SF<sub>6</sub>,互感器性能更加稳定,同时避免了传统充油互感器渗漏油现象,也避免了SF<sub>6</sub>互感器的SF<sub>6</sub>

气体对环境的影响。无需检压检漏,运行过程中免维护。

4)无油设计彻底避免了充油互感器可能出现的燃烧爆炸等事故;高低压部分的光电隔离,使得电流互感器二次开路、电压互感器二次短路可能导致危及设备或人身安全等问题不复存在。

5)光电互感器完备的自检功能,若出现通讯故障或光电互感器故障,保护装置将会因收不到校样码正确的数据而可以直接判断出互感器异常。

6)价格低廉的光纤光缆的应用,大大降低了光电互感器的综合使用成本。由于绝缘结构简单,在高压和超高压中,光电互感器这一优点尤其显著。

### 4 结束语

由于光电互感器具有上述优点,现场运行情况良好,极具推广价值。同时光电互感器的应用使变电站二次系统由传统的模拟信号方式转变为数字信号方式,这一转变势必对已有的变电站自动化技术将产生深刻的影响,将大大提高电网建设的现代化水平,降低变电站建设的总造价,变电站及其自动化技术将进入数字化新阶段,全数字化的变电站自动化系统将出现。

(收稿日期:2008-03-10)

(上接第56页) Eigen analysis of series compensation schemes reducing the potential of subsynchronous resonance. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10 (2).

[6] Canay I M. Anovel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine. part I:theory. T-PAS-101, 1982, 101(10).

[7] Canay I M. Anovel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine, part II: application to an arbitrary network. T-PAS-101, 1982, 101(10).

[8] Agrawal B L, Farmer R G. Use of frequency scanning techniques for subsynchronous resonance analysis. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(2).

[9] X·Lei, D·W·Retzmann. Analyzing Subsynchronous Resonance Using a Simulation Program. Proceeding of PowerCon 2000, Dec. 2000, Vol. 2, pp. 775-781.

[10] Mahmoud Elfayoumy, Carlos Grande Moran. A comprehensive approach for Subsynchronous resonance screening analysis using frequency scanning technique. IEEE Bologna

PowerTech Conference, 2003.

[11] 杨煜,陈陈,伊敏. 一大庆500kV输电系统次同步谐振分析——兼论发电机轴系共振频率[J]. 电网技术, 2000, 24(5):10-13.

[12] 李光琦,张世学,张直平. 频率扫描法分析西北330kV主网高串补水平下的次同步谐振可能性[J]. 中国电机工程学报, 1992, 12(1):57-61.

[13] Prabha Kundur. 电力系统稳定与控制[M]. 北京:中国电力出版社, 2001.

[14] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.

#### 作者简介:

李伟(1981-),男,硕士研究生,主要研究方向为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、高压直流输电、分散式发电等方面的研究。

(收稿日期:2008-02-10)