

# 次同步谐振频率扫描法的电磁暂态仿真实现

杨帆<sup>1</sup>, 康海燕<sup>2</sup>, 伍文城<sup>1</sup>, 郑勇<sup>1</sup>, 丁君<sup>1</sup>, 陈谦<sup>1</sup>

(1. 西南电力设计院, 四川 成都 610021; 2. 华北电力设计院工程有限公司, 北京 100120)

**摘要:** 频率扫描法是规划阶段分析串补系统是否存在次同步谐振风险快捷而有效的方法。借助 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件实现了频率扫描法。该实现方法具有技术门槛较低、所需输入数据低少、结果直观等优点, 可以快速分析在不同运行工况下串补系统发生次同步谐振的可能性。

**关键词:** 次同步谐振; 频率扫描法; 串联补偿; PSCAD/EMTDC

**Abstract:** During the early planning stage, frequency scanning is a rapid and highly effective method for subsynchronous resonance (SSR) analysis of the series compensated transmission network. The frequency scanning method for SSR analysis is carried out by a powerful electromagnetic time domain transient simulation program PSCAD/EMTDC. This implementation method has lower technical threshold, less requirements of input data and the direct-viewing result. This method provides a powerful tool to research the SSR instability in the series compensated power system under different operating conditions.

**Key words:** subsynchronous resonance; frequency scanning; series compensation; PSCAD/EMTDC

**中图分类号:** TM711 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0019-04

串联补偿技术是一种提高电力系统稳定极限的经济有效的手段。串联补偿技术在带来巨大经济效益的同时, 也给系统运行带来了新的挑战。当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), 二者就会彼此互激, 这种现象习惯上称为次同步谐振<sup>[4]</sup> (subsynchronous resonance 缩写为 SSR)。第一起次同步谐振事故发生于 1970 年 12 月, 导致了在美国南加利福尼亚的 Mohave 发电厂汽轮发电机大轴损坏事故<sup>[5]</sup>。之后不到一年的时间, 在 1971 年 10 月该电厂再次发生大轴损坏的同类事故。这两次事故的发生使人们第一次认识到了次同步谐振问题的严重性。

中国正处在电力发展的高峰期。为满足华北、东北地区经济发展对电力能源的需求, 中国将在“十二五”期间兴建多条的西电东送通道, 其中部分 500 kV 交流线路计划加装串联补偿装置。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, 将直接关系到电力系统运行的安全性和经济性。

常用的次同步谐振研究方法包括: 频率扫描法、复转矩系数法、特征值分析法和时域仿真分析法<sup>[6, 7]</sup>。频率扫描 (frequency scanning) 法是分析系统是否存在次同步谐振风险最快捷而有效的方法。该

方法所需的原始数据较少, 不需要发电机组的轴系参数, 计算方法简单, 物理概念明确, 所得结果可以作为进一步精确分析次同步谐振问题的基础。

目前可用于实现频率扫描法的电磁暂态仿真软件主要有 EMTP 和 PSCAD/EMTDC 软件。其中 PSCAD 软件凭借其强大的图形化用户界面, 使用户能更方便地进行频率扫描法分析, 提高研究工作的质量和效率<sup>[8, 9]</sup>。下面首先简要介绍频率扫描法的基本原理, 然后采用 PSCAD 软件对 IEEE 第二基准模型进行频率扫描, 通过对扫描结果的分析得到了一些有意义的结论。

## 1 用于 SSR 分析的频率扫描法

### 1.1 频率扫描法原理

频率扫描法是一种近似的线性方法。具体分析时, 需要研究的相关系统用正序网来模拟; 除待研究的发电机之外的网络中的其他发电机用次暂态电抗等值电路来模拟; 待研究的发电机用感应发电机等值电路来模拟, 如图 1 中的虚线部分所示, 其中的电阻和电感随频率而变化<sup>[6]</sup>。

频率扫描法针对某一特定的频率, 计算从待研究的发电机转子后向系统侧看进去的等效阻抗, 即从图 1 的端口 N 向系统侧看进去的等效阻抗, 通常称该等

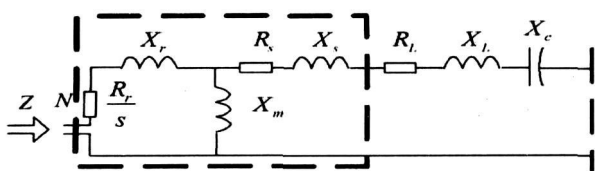


图 1 频率扫描法等值电路示意图

值阻抗为 SSR 等值阻抗;通过频率扫描,可以分别得到等值阻抗的实部(即 SSR 等值电阻)和虚部(即 SSR 等值电抗)随频率而变化的曲线,根据这两条曲线可以对次同步谐振的 3 方面的问题(即感应发电机效应、扭振相互作用和暂态力矩放大作用)作出初步的估计。

### 1.2 频率扫描法判据

如果 SSR 等值电抗等于零(包括串联谐振点和并联谐振点两种情况,串联谐振点是指 SSR 等值电抗随频率增加由负到正的过零点,并联谐振点是指 SSR 等值电抗随频率增加由正到负的过零点)或等值电抗接近于零对应的频率点上的 SSR 等值电阻小于零,则可以确定存在感应发电机效应;如果 SSR 等值电阻在整个频率范围内都大于零,则不存在感应发电机效应。而等值电阻负值的大小则决定着电气振荡发散的速度。该电气振荡并不意味着会引起轴系的负阻尼振荡,但对电气设备而言,可能是不能容忍的。

如果 SSR 等值电抗跌折达到极小值的频率点与机组轴系扭振固有频率接近互补(考虑到计算分析与实际参数的误差,频率互补时记及 ±3 Hz 的范围)并且跌折度(其定义见图 2)大于 5%,就有可能存在扭转相互作用或扭矩放大作用。如果 SSR 等值电抗达到极小值的频率点与机组轴系扭振固有频率的互补值相差大于 3 Hz 则可以排除暂态扭矩放大作用。

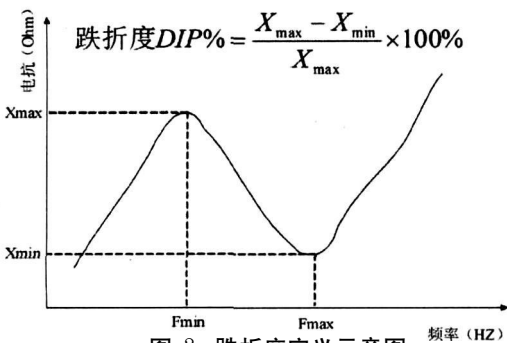


图 2 跌折度定义示意图

### 1.3 频率扫描法对模型的处理

待研究的系统用正序网络模拟。较短的传输线路用集中参数 RLC 模拟,较长传输线路用 π 形等值电路或分布参数模型表示。变压器用集中阻抗等值,

一般忽略电阻仅用集中电抗等值。

待研究的发电机用感应发电机等值电路模拟,其电阻和电感都随频率而变化。网络中的其他发电机用发电机短路等值电路(即次暂态电抗)模拟。由于待研究发电机及其升压变压器的特性对于频率扫描结果有很大影响,而变压器的电抗比发电机暂态电抗大得多,所以变压器的电抗表示的越准确越好。

电力系统中的负荷能够改变系统阻尼,为了得到保守的研究结果,通常予以忽略。然而电力系统中的负荷对于抑制扭转相互作用有较大影响,所以当大量的负荷位于待研究发电机附近时,负荷可以用恒阻抗模型表示。

## 2 用于 SSR 分析的算例模型

### 2.1 IEEE 基准模型

1970 年和 1971 年美国 Mohave 电站连续两次因 SSR 造成机组大轴断裂,这一典型事故引起了国际学术界和电力工程界的严重关注,从此掀起了 SSR 研究的热潮。IEEE(国际电气电子工程师协会)于 1973 年专门成立了一个次同步谐振专题组(SSR working group),组织、协调有关 SSR 的研究工作。该专题组多次召开有关机组轴系与电力系统扭振耦合作用问题的专题学术会议<sup>[10-12]</sup>,先后提出的两种基准模型<sup>[13,14]</sup>成为了日后研究电力系统次同步谐振的经典模型。

在这两种基准模型中,汽轮机轴系模型采用 4~6 个集中质量块和联结它们的理想弹簧所组成的简单质量弹簧模型来表示。这种模型对频率较低的扭振模态具有一定的精度,且建模过程简单,因此在 SSR 分析研究中得到普遍应用。

研究 SSR 问题需要有足够精度的发电机模型及参数。IEEE 两种基准模型中,发电机采用经典的 6 阶 Park 方程模型。

由于次同步谐振频率范围较低频振荡宽得多,大约在 10~50 Hz 之间,为了保证足够的分析精度,线路模型不能再采用代数方程来描述,而需要采用考虑电磁暂态过程的微分方程模型,同时计及发电机转速变化所带来的影响。

对于系统中的汽轮机调速系统以及发电机励磁系统等,由于其响应速度相对较慢,忽略它们不会对串补系统次同步谐振特性带来显著影响。因此 IEEE 基准模

型在建模时没有考虑汽轮机调速系统和励磁调节系统。

## 2.2 算例模型描述

本次研究所采用算例系统是基于 IEEE 第二基准模型构建的,如图 3 所示。其中发电机及其升压变压器的参数用某国产型号的 600 MW 汽轮机组和配套变压器参数代替。

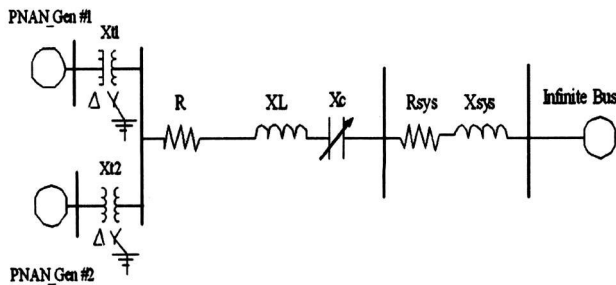


图 3 算例系统示意图

该型号机组轴系机械转子的固有振荡模态频率如表 1 所示。

表 1 算例机组固有振荡模态频率

| 模态阶次         | 模态 1  | 模态 2  | 模态 3  |
|--------------|-------|-------|-------|
| 固有频率 /Hz     | 13.60 | 25.60 | 30.70 |
| 电气谐振模态频率 /Hz | 36.40 | 24.40 | 19.30 |

PSCAD/EMTDC 程序中实现的算例系统模型如图 4 所示。PSCAD 中所有的模型及其参数设置都是图形化地实现,因此准备和系统模拟试验的速度特别是计算大型复杂系统的速度,通常都要比用 EMTTP 快得多。PSCAD/EMTDC 提供有比较完整的电力系统元件模型库,其中包括谐波分析模块,可以很方便地实现频率扫描法。

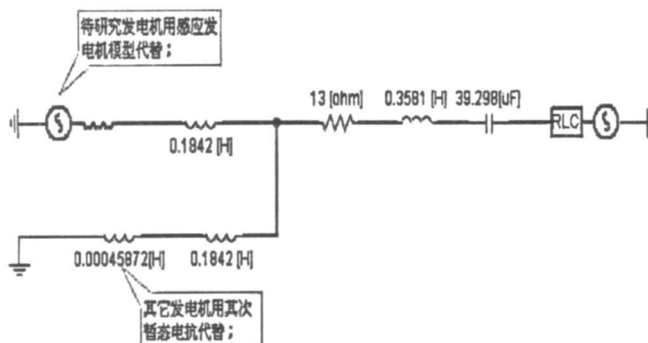


图 4 PSCAD 程序中的算例系统模型

## 3 频率扫描法结果分析与验证

频率扫描法可以对不同运行方式下的待研究系统进行扫描,包括正常运行、任一条线路故障切除以及机组跳闸等方式。本次研究主要考虑以下 3 种运行方式:①串补度为 50%,两机运行;②串补度为

50%,一机运行;③串补度为 35%,一机运行。图 5~图 7 所示为该 3 种运行方式的等值阻抗随频率变化的曲线图。

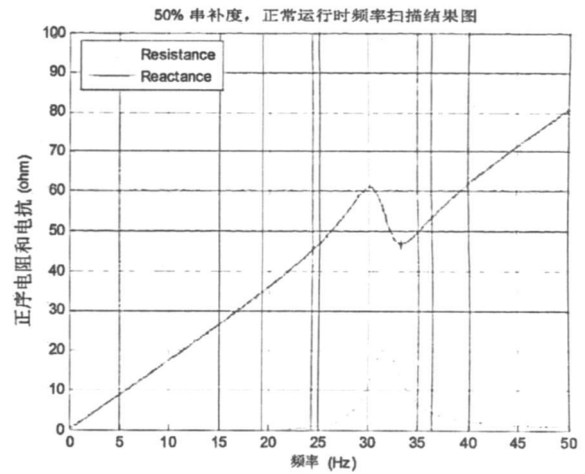


图 5 运行方式 1 等值阻抗扫描结果

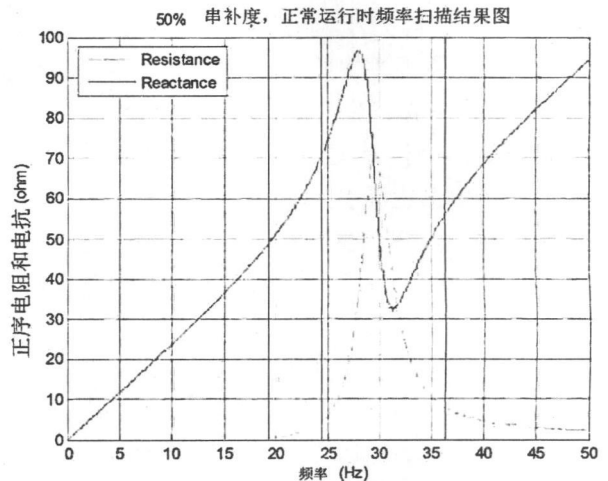


图 6 运行方式 2 等值阻抗扫描结果

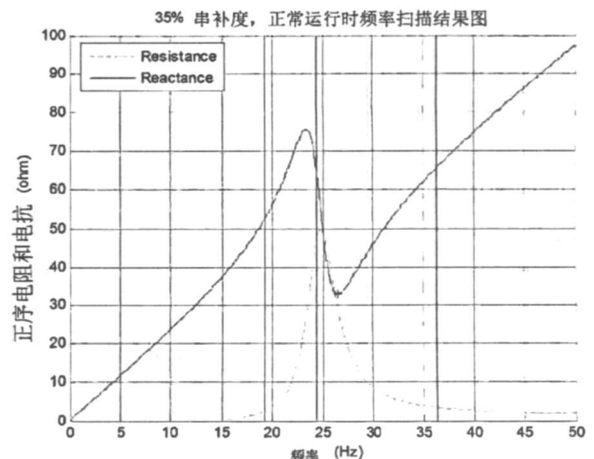


图 7 运行方式 3 等值阻抗扫描结果

从以上计算结果可见:

(1)对于所考虑的 3 种运行方式,在次同步频率范围内,等值电阻均大于  $Q$  不会产生感应发电机效应。

表 2 3 种运行方式频率扫描结果表

|      | $F_{min}$<br>/Hz | $F_{max}$<br>/Hz | $X_{min}$<br>/Ω | $X_{max}$<br>/Ω | DIP<br>/% |
|------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------|
| 方式 1 | 30.14            | 33.25            | 46.77           | 61.13           | 23.5      |
| 方式 2 | 28.07            | 31.32            | 32.67           | 96.64           | 66.2      |
| 方式 3 | 23.33            | 26.48            | 32.85           | 75.65           | 56.57     |

(2)方式 1 和方式 2 等值电抗跌折达到极小值的频率分别为 33.25 Hz 和 31.32 Hz 与发电机轴系机械转子各模态的电气谐振模态频率相差均大于 3 Hz 可以基本排除发生次同步谐振的可能。

(3)方式 3 等值电抗跌折达到极小值的对应频率为 26.48 Hz 与发电机转子模态 2 的电气谐振模态频率 24.4 Hz 相差小于 3 Hz 且跌折度大于 5%，因此方式 3 可能发生扭转相互作用和扭矩放大现象。

(4)串补度越大，等值电抗跌折达到极小值的频率也越大。只有当极小值频率与机组轴系固有频率互补时，才有可能发生次同步谐振。因此并不是串补度越大就越容易发生次同步谐振。

(5)系统是否发生次同步谐振受运行方式影响较大，计算时应充分考虑各种可能的运行方式。

由于等值电抗极小值频率随运行方式的不同，会在一定的频率范围内变化 (0~10 Hz)，因此在机组轴系选型时，理论上可以尽量避免轴系固有振荡频率与等值电抗跌折处频率互补，减小发生次同步振荡的风险。然而一般大型火电机组的轴系采用典型化设计，轴系固有振荡频率可以调整的范围极小。因此在规划设计阶段不能期望通过调整轴系固有振荡频率来避开次同步振荡区域，而应该考虑采用其他手段和抑制方法。

## 4 结 论

在规划设计阶段，频率扫描法是分析串补系统是否存在次同步谐振风险最快捷而有效的方法。前面以 IEEE 第二基准模型为算例，采用目前应用广泛的 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件实现了频率扫描法。该方法具有技术门槛较低、所需输入数据低少、结果直观等优点，可以快速分析在不同运行工况下串补系统发生次同步谐振的可能性。

## 参考文献

[1] P. M. Anderson R. G. Farmer Series Compensation of Power Systems[M]. California USA: PBLSH Inc. 1996.

[2] Jancke Gunnar and K. F. Akerstrom. Developments and Experience with Series Capacitors in Sweden [J]. AIEE Trans., 1952, 71(12): 1118—1123.

[3] Maneatis J. A., E. J. Hubacher W. N. Rothenbuhler and J. Sabath. 500kV Series Capacitor Installations in California [J]. IEEE Trans on PAS. 1970, PAS—89: 1138—1149.

[4] IEEE Committee Report Terms Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations [J]. IEEE Trans on PAS. 1985, PAS—104(6): 1326—1334.

[5] M. C. Hall D. A. Hodges Experience with 500KV Subsynchronous Resonance and Resulting Turbine Generator Shaft Damage at Mohave Generating Station [J]. IEEE Pub., 76CH1066—0—PWR, 1976: 22—29.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 周翊炜, 李兴源. 基于 PSCAD/EMTDC 的不平衡负载的静止无功功率补偿研究 [J]. 四川电力技术, 2007, 30(3): 45—48.

[9] 王淑慧, 余锐, 安莲淑, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的电压跌落评估方法 [J]. 四川电力技术, 2007, 30(2): 25—28.

[10] IEEE PES Publications 76CH1066—0—PWR. Analysis and Control of Subsynchronous Resonance[C]. IEEE Power Engineering Society 1976 Winter Meeting.

[11] IEEE PES Publications 79TH0059—6—PWR. State of the art Symposium — Turbine Generator Shaft Torsionals[C]. IEEE Power Engineering Society 1979 Winter Meeting.

[12] IEEE PES Publications 81TH0086—9—PWR. Symposium on Countermeasures for Subsynchronous Resonance [C]. IEEE Power Engineering Society 1981 Summer Meeting.

[13] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance [J]. IEEE Trans PAS. 1977, PAS—96(5): 1565—1572.

[14] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group Second Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance [J]. IEEE Trans PAS. 1985, PAS—104(5): 1057—1066.

## 作者简介:

杨帆 (1980), 男, 工程师 博士, 毕业于上海交通大学, 主要从事电力系统规划、交直流电力系统低频振荡及次同步振荡方面研究。 (收稿日期: 2010—06—22)