

电力系统低频振荡

郭权利

(沈阳工程学院电气工程系, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 由于系统缺乏阻尼或系统负阻尼引起的输电线路上的功率波动频率一般在 0.1~2.0 Hz 之间, 通常称之为低频振荡。随着电力系统规模的不断扩大和快速励磁系统的大量应用, 电网的低频振荡问题越来越引起人们的关注。低频振荡影响电力系统稳定性和继电保护装置的可靠性。介绍了低频振荡的一些概念、各种机理、研究现状、常用的分析方法和控制方法, 并对以后的工作重点做了进一步的阐述。

关键词: 低频振荡; 频率波动; 负阻尼; 分析方法

Low Frequency Oscillation in Power System

GUO Quan-li

(Electrical Engineering Department, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China)

Abstract: Because of the lack of damping system or negative damping system on the transmission line caused power fluctuations generally between 0.1-2.0 Hz, usually called as low-frequency oscillations. With the development of the size of the power system and large application of the rapid excitation system, the low-frequency oscillation (LFO) of the power system are causing for more and more concern. And low-frequency oscillation affect the stability of the power system and the reliability of the relay device. This text introduces the concept of low-frequency oscillations, all kinds of mechanism and research status, analysis and control methods, and elaborate the focus of the work for a further step.

Key words: low-frequency oscillation; frequency fluctuating; negative damping; analysis method

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)22-0114-03

0 引言

低频振荡产生的原因是由于电力系统的负阻尼效应, 常出现在弱联系、远距离、重负荷输电线路, 在采用快速、高放大倍数励磁系统的条件下更容易发生。系统缺乏阻尼甚至阻尼为负, 对应发电机转子间的相对摇摆, 表现在输电线路就出现功率波动, 由系统缺乏阻尼或系统负阻尼引起的输电线路上的功率波动频率一般在 0.1~2.0 Hz 之间, 通常称之为低频振荡(又称功率振荡, 机电振荡)。一般来说, 电力系统振荡模式可分为两种类型: 地区振荡模式和区域振荡模式, 若系统低频振荡频率很低(0.1~0.5 Hz), 则一般认为属互联系统区域间振荡模式。而如果振荡较高, 在 1 Hz 以上, 则认为是本地或区域间机组间的振荡模式^[1]。对于地区振荡模式, 振荡频率较高, 参与的机组较少, 因而只要在少数强相关机组上增加阻尼, 就能显著地增加振荡模式的阻尼。对于区域振荡模式, 振荡频率较低, 参与的机组较多, 因而只有在多数参与机组上增加

阻尼, 才能显著地增加振荡模式的阻尼。显然, 抑制区域振荡模式的低频振荡要比抑制地区振荡模式的低频振荡更加复杂和困难, 所以, 系统运行中更容易发生区域振荡模式的低频振荡。

由于低频振荡影响着系统的安全稳定运行, 并对继电保护装置动作行为产生相当大的影响, 因而本文从低频振荡的一些概念和当前研究状况分析, 总结了当前分析低频振荡问题的方法和进一步的研究方向。

1 低频振荡的负阻尼机理

电力系统受到扰动时, 会发生发电机转子间的相对摇摆, 表现在输电线上就会出现功率波动。如果扰动是暂时的, 在扰动消失后, 可能出现两种情况: 一是发电机转子间的摇摆很快平息, 二是发电机转子间的摇摆平息的很慢甚至持续增长, 若振荡幅值持续增长, 以致破坏了互联系统之间的静态稳定, 最终将使互联系统解列。产生后者情况的原因是系统缺乏阻尼或者系统阻尼为负, 现象表现为受

到扰动后发生振荡并长时间不停息的弱阻尼振荡或者负阻尼造成的自发振荡。

F. Demello 对单机无穷大系统低频振荡现象结合运用状态方程、传递函数框图及 K 系数法, 分析了阻尼转矩大小性质的变化规律, 发现在较高外部系统电抗和较高发电机输出条件下, 高放大倍数的快速励磁系统在增加系统的同步转矩的同时, 有可能会给系统带来负的阻尼转矩, 当它抵消发电机原有的正阻尼后, 便引发增幅低频振荡^[2]。这一机理认为: 低频振荡的原因是由于励磁系统放大倍数的增加, 产生了负阻尼作用, 抵消了系统固有的正阻尼, 使得系统的总阻尼很小或为负。在这种情况下, 就会引起转子增幅振荡, 扰动将逐渐被放大, 从而引起系统功率的振荡。这一方法是基于线性系统理论, 通过分析励磁放大倍数和阻尼之间的关系来解释产生低频振荡的原因。

产生负阻尼的原因:

- 1) 发电机的励磁系统, 尤其是快速励磁系统会引起系统负阻尼;
- 2) 电网负荷过重会使系统阻尼降低;
- 3) 电网互联也会使系统阻尼降低。

2 低频振荡的其它机理

2.1 强迫功率振荡机理解释

电力系统中存在着持续的周期性小扰动, 如负荷的波动、发电机励磁系统或调速系统工作不稳定而引起的持续扰动等, 这些小扰动可能激起大幅度的功率振荡, 甚至导致系统稳定破坏, 这类振荡称为强迫功率振荡。强迫振荡又称共振型低频振荡, 它具有起振快、起振后保持等幅同步振荡和失去振荡源振荡很快衰减等特点。多机系统和实际电网进行仿真研究说明了系统中存在发生共振机理低频振荡, 并综合考虑汽轮机热力系统和电气系统的相互影响, 从热力系统寻找共振机理低频振荡的产生原因^[3]。研究表明: 汽轮机蒸汽初终参数会引起机械功率的正比变化, 各个参数对机械功率的影响程度各不相同, 对于中间再热汽轮机组, 再热蒸汽压力脉动引起输出机械功率的变化最大, 其次是主蒸汽压力脉动, 而蒸汽初温和背压对输出机械功率的影响相对非常小。电力系统共振机理低频振荡的扰动源可能就是这些汽轮机蒸汽初终参数脉动, 尤其是主蒸汽压力脉动和再热蒸汽压力脉动。

2.2 谐振机理

当电力系统受到外界周期性扰动时, 扰动频率和系统的自然频率存在某种特殊关系时, 会产生谐振振荡, 当其处于低频区时表现为低频振荡。

2.3 分岔理论

利用分岔理论分析了低频振荡现象, 提出了计算 Hopf 分岔横截条件的解析计算式^[4]。依据 Hopf 分岔理论和中心流形理论研究了低频振荡中的非线性奇异现象。提出了与常规线性化分析不同的小干扰稳定域的新观点。得到了在临界点附近即使系统全部特征根都具有负实部时, 在小扰动下系统的特性与状态也可能发生突变的新结论。利用 Hopf 分岔理论可以得到分岔点附近实际振荡的稳定特性, 由于计算复杂性, 目前分析要受限于系统规模和方程阶次。尽管许多学者在电力系统研究中运用了分岔理论, 但是目前电力系统的分岔研究仅仅是开始, 绝大多数的研究结论基本上由仿真得到, 真正利用分岔所独特的理论对电力系统分析和设计还有许多工作要做。

2.4 混沌理论

混沌是确定性系统表现出来的貌似随机的运动。它的特征是对初始条件非常敏感, 时间响应曲线的频谱很宽, 具有正的 Lyapunov 指数, 奇异吸引子具有分数维等。实际电力系统是一个高维、多变量、非线性的大规模复杂动力系统, 受周期或准周期扰动的电力系统, 当扰动的幅值和扰动的频率满足一定关系时, 一定会产生混沌振荡, 甚至会失去稳定, 而造成混沌现象的根本原因是由于电力系统本质的非线性而不是由于系统遭受的扰动^[5]。由于电力系统是一个典型的大规模复杂非线性系统, 在一定条件下其必然会发生分岔、混沌现象, 分岔、混沌将会影响电力系统的稳定运行, 所以对电力系统分岔、混沌的控制研究就显得尤为重要。所以通过混沌振荡机理研究低频振荡现象也就变得非常重要。

3 低频振荡分析方法

电力系统低频振荡常用的分析方法主要有: 基于线性化理论的特征值分析法和基于非线性动态方程的分岔理论分析法、时域仿真。

3.1 低频振荡的全部特征值分析法

所谓全部特征值分析法就是: 首先通过变换以形成全系统的线性化状态方程, 然后利用 Q-R 变换法求出系统全部的特征值, 最后根据特征值鉴别低频振荡模式, 从而得到系统的运行状态。这种方法虽然结果可靠, 但对大型系统而言求解过程运算量过大, 会出现“维数灾”这一现象, 因而不可行的。

3.2 低频振荡的选择模式分析法

选择模式分析法 SMA (Selective Modal Analysis) 的基本思想就是通过保留与低频振荡相关

的状态变量并消去其它的状态变量从而大大降低状态方程的阶数,然后用迭代的方法求解出低频振荡的模式和模态,这一方法能较好地适应大规模电力系统的低频振荡分析。

3.3 低频振荡全维部分特征值分析法

这一方法就是将全系统微分方程的系数矩阵转换成维数与之相同的另一矩阵,然后通过合适的计算方法得出按模递增或递减的顺序排列的特征值,最后通过反变换就可以得出我们所关心的特征值。

3.4 低频振荡的自激分析法

自激分析法的基本思想是在被研究的系统中任选一机作为自激机,将其状态变量作为保留变量,而将系统的其余部分进行等效,这样就得到一个等效的“二阶”系统,从而可以通过迭代求解的方法比较容易地求出此“二阶”系统的特征根。自激法可以有效地解决电力系统的“维数灾”问题,但其收敛性相对 SMA 法要差,而且在多机系统中的一个模式同时和几台机强相关时,并在这几台机作为自激机时,会由于都收敛于这一模式而产生丢根现象;另外,若多机系统的一台机和几个机电模式相关,则用此机做自激机时,只能收敛到其中一个强相关模式,此时也会导致结果失去完整性。

3.5 Hopf 分歧理论分析法

系统发生 Hopf 分歧后,需要求解问题的是:分歧发生的方向和分歧后系统是否稳定,而它们分别决定于横截条件和曲率系数。因此,只要求解出横截条件和曲率系数就可以知道系统的运行状态。对于 2 维空间来说,曲率系数的求解较为简单,但若为高维系统则须将高维非线性空间向低维流型简化,约化的方法主要有:中心流型理论、Lyapunov 和 Schmit 方法等。

3.6 时域仿真

时域仿真是借助计算机并以数值分析为基础,得出系统在一定扰动下的时域运行变化情况。这一方法能够得出计及系统非线性因素情况下的运行状态,但这一方法也有很多缺点,如对大型系统的仿真时间较长等。

3.7 基于量测的方法

基于量测的方法是直接对现场记录的数据波形进行信号分析,辨识出系统的振荡模式信息。应用试验方法分析实测低频振荡是一种对理论分析有益的补充和验证,对解决现场低频振荡原因的研究提供了一种有力的工具。

此外,还有从能量的角度进行低频振荡问题的分析研究,但到目前为止这一方法还未能成功应用于工程实际,有待更进一步的研究。

4 低频振荡对策

由于低频振荡的产生是由系统缺乏阻尼或系统负阻尼引起的输电线路上的功率波动,所以在系统控制上有两方面的考虑:1)调整控制措施,减小其带来的负阻尼;2)通过附加控制提高额外的阻尼。

提高系统阻尼方法目前常用的是在发电机励磁系统中加入电力系统稳定器(PSS)。PSS 为发电机励磁系统电压调节器的附加反馈装置。电力系统数字式、高增益、高强励倍数的快速励磁系统的广泛采用,虽然提高了系统的静态稳定、暂态稳定和电压稳定,但同时使励磁系统的时间常数大为减小,从而降低了系统阻尼,对联系较弱的系统影响较大,使系统中不断出现弱阻尼,甚至负阻尼。装设 PSS 的目的是在系统出现扰动时为发电机转子转速摇摆提供正阻尼。转子摇摆在一个较宽的频率范围内,即从较低的系统模式(典型为 0.2~1 Hz)到较高的地区模式(典型为 1~2 Hz)。系统模式指一个系统一组发电机组相当于互连的另一系统发电机组的摇摆。PSS 的作用是通过增加系统模式的阻尼来加强系统间的联系和提高输电能力。但一般认为在低频振荡频率低于 0.3 Hz 后,用 PSS 抑制低频振荡效果不是很好,而且频率越低效果越差。

除了采用电力系统稳定器(PSS)作励磁附加控制,还应减少重负荷输电线,采用串联补偿电容,减少送、受电端的电气距离,采用直流输电方案,使送、受端不发生功率振荡,在长距离输电线中部装设静止无功补偿器(SVC)做电压支撑,并通过其控制系统改善系统动态性能。必要时采取切机措施甚至解列措施等。但应该注意在采取应急对策时,尽可能不切除大量负荷,不扩大事故。

5 结束语

低频振荡的机理研究已经取得了一定的成果,不过因为电力系统本身的特性所决定,已有的几种机理解释都有自身的假设条件和局限性,不能够完全通用解释各种情况下的低频振荡现象。所以应当进一步加强对低频振荡的分析、完善现有理论并及时发展新理论,关注现代控制技术的发展,在电力系统中引进新的控制技术和控制装置,在系统发生低频振荡时可以采取更好更快的控制措施进行处理。

参考文献

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

3 改进后的电压并列回路分析

改进后的电压并列回路满足第2条“对增容变电站PT并列回路的要求”中的内容。

1) 两段母线独立运行。母联(或分段)断路器和隔离开关的辅助动合触点断开状态,并列继电器BJ1、BJ2失磁,其动合触点打开;II G隔离开关的辅助动断触点打开,闭锁继电器BSJ线圈失磁,其动断触点闭合。此时,II段母线PT测量保护用电压回路通过BSJ动断触点向其改造后独立的计量用电压回路供电。

2) 两段母线并列运行,使用I段母线PT。母联(或分段)断路器和隔离开关的辅助动合触点闭合状态,并列继电器BJ1、BJ2励磁,其动合触点闭合;II G隔离开关的辅助动断触点闭合,闭锁继电器BSJ线圈励磁,其动断触点打开。此时,II段母线PT测量保护用电压回路与其改造后独立的计量用电压回路断开,分别由I段母线PT的测量保护用电压回路、计量用电压回路供电。

3) 两段母线并列运行,使用II段母线PT。母联(或分段)断路器和隔离开关的辅助动合触点闭合状态,并列继电器BJ1、BJ2励磁,其动合触点闭合;II G隔离开关的辅助动断触点打开,闭锁继电器BSJ线圈失磁,其动断触点闭合。此时,II段母线PT主二次绕组分别向其改造后独立的计量用电压回路供电、I段母线PT的测量保护用电压回路和计量用电压回路供电。

综合上述分析,改进后的电压并列回路满足要求。

4 现场应用

改进后的电压并列回路于2001年11月在某

110 kV 变电站增容工程中首次探索使用,运行一年后,回访满足运行要求。以后,存在该类型问题基建增容工程、无人值班改造工程中广泛采纳本改进措施。

5 结束语

改进后的电压并列回路,成功解决了长期困扰运行单位、计量部门的同一变电站内需要并列的母线PT主二次绕组数量配置不同的电压回路并列问题。但是,仍存在如下问题有必要改进:

1) 隔离开关的辅助触点,因运行环境差,经常出现故障,影响了并列回路的可靠性。为了提高自动并列的可靠性,应选用质量好的隔离开关辅助触点,并加强经常性的维护。同时,建议使用具有保持功能的双位置继电器,避免直流电源消失使并列回路失去作用,进一步提高继电保护电压回路的可靠性。

2) 本改进措施没有考虑原有PT二次绕组的准确级、以及其容量是否满足增容后并列情况下准确级所要求的负荷范围,设计过程中应注意校核相应参数。

参考文献

- [1] DL/T 5136-2001, 火力发电厂、变电所二次接线设计技术规定[S].
- [2] 宋继成. 220~500kV 变电所二次接线设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

收稿日期: 2008-02-18; 修回日期: 2008-05-14

作者简介:

陆浩进(1957-), 男, 专科, 助理工程师, 长期从事基建工程电气技术管理; E-mail: bdec@bg.hbpc.com.cn

田辉(1966-), 男, 本科, 高级工程师, 长期从事变电站电气二次设计。

(上接第116页 continued from page 116)

NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Analysis on Dynamics Power System. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

- [2] Demello F P, Concordia C. Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(4): 316 - 329.

- [3] 韩志勇, 贺仁睦, 徐衍会. 由汽轮机压力脉动引发电力系统共振机理的低频振荡研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, (21).

HAN Zhi-yong, HE Ren-mu, XU Yan-hui. Power System Low Frequency Oscillation of Resonance Mechanism Induced By Turbo-pressure Pulsation[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, (21).

- [4] 王宪荣. 潮流和最优潮流的研究 (博士论文)[D]. 哈尔

滨: 哈尔滨工业大学, 1990.

WANG Xian-rong. Power Flow and Optimal Power Flow Analysis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1990.

- [5] 王宝华, 杨成梧, 张强. 电力系统分岔与混沌研究综述[J]. 电工技术学报, 2005, (07).

WANG Bao-hua, YANG Chen-wu, ZHANG Qiang. Summary of Bifurcation and Chaos Research in Electric Power System[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, (07).

收稿日期: 2008-09-16

作者简介:

郭权利(1971-), 男, 硕士, 从事继电保护理论与实践教学的工作。E-mail: guo_sunlight@sina.com