

互联电网低频振荡的相关问题及研究

刘隽¹, 李兴源¹, 邹全平², 陈树恒¹, 何朝荣¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 沈阳工程学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 综述了电力系统低频振荡发生的机理、分析方法、抑制措施及存在的相关问题; 并提出建立基于广域测量系统(WAMS)的实时低频振荡监控系统, 将频域分析法与 Prony 辨识法结合起来, 在线分析系统的振荡模态; 并首次提出将模态级数法用于互联电网“超低频振荡”的机理分析。

关键词: 互联电网; 低频振荡; 超低频振荡; 广域测量系统(WAMS); 模态级数

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)16-0070-08

0 引言

随着电网规模的日趋庞大和结构的日趋复杂, 局部的扰动可能会影响整个电网的正常运行, 甚至出现一些国内外未见报道的异常动态行为, 如频率低至 0.13 Hz 的“超低频振荡”, 及由于联络线的功率振荡幅值远远大于预期的计算结果, 致使整个互联电网的阻尼明显下降等现象, 目前, 国内外学术界对这些问题产生的原因和事件发展的特性还缺乏足够清楚的认识, 也无相关理论文献可借鉴, 更不用说相关的预防对策; 这种现状使得广域安全防御系统的建立缺乏必要的理论基础, 严重危及到电网的安全稳定运行。深入研究电力系统中各种异常动态行为的机理与特征并提出相应的预防措施, 是建立安全防御体系保证系统安全运行的基础。

电力系统出现的振荡按所涉及的范围和振荡频率的大小大致分为两种类型: 局部模态(Local Modes)和区域间模态(Interarea Modes)^[1]。局部振荡模态是指系统中某一台或一组发电机与系统内的其余机组的失步。由于发电机转子的惯性时间常数相对较小, 因此这种振荡的频率相对较高, 通常在 1~2 Hz 之间。区域间振荡模态是指系统中某一个区域内的多台发电机与另一区域内的多台发电机之间的失步。由于各区域的等值发电机的惯性时间常数比较大, 因此这种振荡模态的振荡频率较低, 通常在 0.1~0.7 Hz 之间^[2]。

1 低频振荡的发生机理

对低频振荡的物理本质的研究, 一直是国内外

专家学者研究的热点。关于它的发生机理, 主要有以下几个方面:

1) 欠阻尼机理

文献[3]中最先指出低频振荡是由于在特定情况下系统提供的负阻尼作用抵消了系统电机、励磁绕组和机械等所产生的正阻尼, 在欠阻尼的情况下扰动将逐渐被放大, 从而引起系统功率的振荡。

还有一种比较特殊的欠阻尼情况, 在文献[4]中指出, 若系统阻尼为零或者较小, 则由于扰动的影响, 出现不平衡转矩, 使得系统的解为一等幅振荡形式, 当扰动的频率和系统固有频率相等或接近时, 这一响应就会因共振而被放大, 从而引起共振型的低频振荡。这种低频振荡具有起振快、起振后保持同步的等幅振荡和失去振荡源后振荡很快衰减等特点, 是一种值得注意的振荡产生机理。

2) 模态谐振机理

电力系统的线性与模态性质随系统参数的变化而变化, 当两个或多个阻尼振荡模态变化至接近或相同状态, 以至相互影响, 导致其中一个模态变得不稳定, 若此时系统线性化模型是非对角化的, 就称之为强谐振状态; 反之为弱谐振状态。文献[5]中提出, 强谐振状态是导致发生低频振荡的先导因素。当出现或接近强谐振状态时, 系统模态变得非常敏感, 反应在复平面上, 随着参数变化, 特征值迅速移动, 变化接近 90°, 这样, 对于频率接近的系统特征值在强谐振之后, 阻尼很快变得不同, 其中一个特征值穿过虚轴, 从而引起振荡。

3) 发电机的电磁惯性引起的低频振荡

由于发电机励磁绕组具有电感, 则由励磁电压在励磁绕组中产生的励磁电流将是一个比它滞后的励磁电流强迫分量, 这种滞后将产生一个滞后的控制, 而这种滞后的控制在一定条件下将引起振

基金项目: 国家重点基础研究项目(2004CB217907); 国家自然科学基金重大项目(50595412)

荡^[6]。

而且由于发电机的转速变化,引起了电磁力矩变化与电气回路耦合产生机电振荡,其频率为 0.2 ~ 2 Hz。

4) 过于灵敏的励磁调节引起低频振荡

为了提高系统稳定,在电力系统中广泛采用了数字式、高增益、强励磁倍数的快速励磁系统,使励磁系统的时间常数大大减小。这些快速励磁系统可以对系统运行变化快速作出反应,从而对其进行灵敏快速的调节控制,从控制方面来看,过于灵敏的调节,会对较小的扰动做出过大的反应,这些过大的反应将对系统进行超出要求的调节,这种调节又对系统产生进一步的扰动,如此循环,必将导致系统的振荡。实际电力系统运行证明,采用快速励磁系统后,低频振荡问题日益突出。

5) 电力系统非线性奇异现象引起低频振荡

根据电力系统小扰动稳定性理论,系统的特征值实部为负,则系统是稳定的;若特征值出现零值或是实部为零的一对虚根,则为稳定的临界状态;若特征值为正实数或是有正实部的复数,则都是不稳定的。但实际上,由文献[8,9]可知,由于系统的非线性特性,系统在虚轴附近将出现奇异现象。即使系统的特征值全为负或是有负的实部的复数,在小扰动下,非线性造成的分歧也可能使系统的特性和状态发生突变,产生增幅振荡。

6) 不适当的控制方式导致低频振荡

抑制低频振荡的过程,就是调节励磁电流 i_f ,使它产生的电磁转矩减缓转子在速度变化中的动能和未能的转换。但在一些扰动中,机端电源和电磁转矩对励磁电流的要求会产生矛盾,使励磁调节不能同时满足二者的要求,甚至起了相反的作用,破坏了系统的稳定^[10]。因此,如控制的目的是抑制系统的低频振荡,而使用以 $\Delta\delta, \Delta U_c, \Delta f$ 等与转子转速无直接联系的信号为输入控制量的控制方式,则在一定条件下会引起系统的增幅振荡。

7) 混沌振荡机理^[11-13]

混沌现象是在完全确定的模型下产生的不确定现象,它是由非线性系统中各参数相互作用而导致的一种非常复杂的现象。文献[11]针对低频振荡的参数进行分析得出了如下结论:① 仅有阻尼而无周期性负荷扰动时,系统不会出现混沌振荡;② 在周期性扰动负荷的作用下且当扰动负荷的值超过一定范围的时候,系统出现混沌振荡;③ 在周期性负荷扰动下,当阻尼系数接近某一数值时,系统发生

混沌振荡。

以上是从内部因素考虑的低频振荡发生的机理,还有一些具体的外部因素也是导致低频振荡发生的原因,内部原因和外部原因互为因果关系,可以相互解释。如^[14]: a. 电网长链形结构和弱联络线; b. 主电站备用功率裕度不充分或没有; c. 区域功率严重不平衡(或出现负荷波动); d. 抽水蓄能电站以抽水方式运行状态; e. 直流控制系统、控制模式以及交直流间相互作用; f. 负荷的波动。

2 低频振荡的分析方法

2.1 小扰动分析法^[15-17]

小扰动分析法又称为特征值分析法,是采用线性化系统分析的方法,可以提供有价值的线性化系统频域信息。对于简单的电力系统或者是机组不多的系统,采用罗斯(Routh)判据^[10];对于机组较多的电力系统,采用状态空间法。具体的过程如图1所示^[18]。

根据判断 A 矩阵特征值方法的不同,小扰动法又分为全部特征值法和部分特征值法。

全部特征值法最初是采用 Q-R 算法,算出系统全部的特征值,找出系统全部振荡模态。但此法占用内存空间大,计算速度慢,且容易产生“维数灾”。因此适用于中等规模的电力系统。

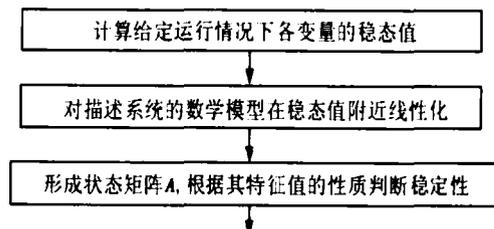


图1 小扰动分析方法的过程

Fig. 1 Small disturbance analysis

目前对于互联网而言,采用在原来 Q-R 算法的基础上,利用分解算法对全部特征值进行并行计算,从而降低计算过程中的阶数。在电力系统综合程序(PSASP6.1)小干扰稳定计算模块还提供了迭代转 Rayleigh 商迭代法^[19],采用稀疏矩阵技术,使之不受系统规模的限制,可以求解出所需系统的特征值和特征向量,此法是目前比较常用的算法之一。

部分特征值法又称降阶特征值法(SMA),是只计算一部分对稳定性判别起关键作用的特征值,利用矩阵稀疏技术及其他技巧来分析,PSASP 中的同时迭代法就是采用这种原理,可满足互联网的速

度和精度的要求,但容易产生漏掉某些负阻尼或弱阻尼模式。

文献[20]提出了再改进的 SMA 法,这一方法是依据低频振荡失稳振荡模式的特征,巧妙避开了改进 SMA 算法中对迭代初值的求解,运用反幂法在右半平面上搜索失稳的机电振荡模式,从而有效避免了丢根和收敛到非机电模式的情形。

文献[21]中首次提出了 AESOPS (Analysis of Essentially Spontaneous Oscillations in Power System) 算法,此算法仅计算与转子角模式相关的特征值,而且一次只算一对共轭特征值。是通过在所选电机的转子上施加一个外部转矩来计算的。系统的复频率响应是通过求解一组适当的复合代数方程来计算的。线性系统响应决定了特征值修正估计值,这个过程一直重复到对所选发电机的影响特别大时结束。如果发电机的主振荡模式有几个,那么所计算的特征值取决于初始估计值^[18]。此法的限制之一是需要大量的搜索计算以便找到所有的临界模式,除非临界模式的一般特性事先已知。

Arnoldi 法也是一种降阶方法,在文献[22]中首次提出,但算法本身数值特性不好,对于出现几个主振荡模式的情况,将失去正交性并且收敛很慢。随后在文献[23]提出的改进的 Arnoldi 方法(MAM)解决了正交性和迭代过程中的一些问题,基于降阶技术把要计算特征值的矩阵 A_n 简化成一个上三角的海森博格(Hessenberg)矩阵 H_m ,当 m 等于 n 时, H_m 的特征值就是 A_n 的特征值^[18];当 $m < n$ 时, H_m 的特征值就是 A_n 特征值的一个子集。而且, H_m 的特征值总可以收敛到 A_n 的最大(和最小)模的特征值,因此可计算任何系统模式对应的特征值^[18],也解决了 AESOPS 算法局限性的问题。

后面两种方法是国际上通用的大型电力系统特征值计算方法,是美国 EPRI 的 SSSP 软件包的标准模块。

2.2 基于非线性动态方程的分歧理论分析法

上述小扰动分析法是平衡点局部线性化方法,能有效地反应线性化系统的局部稳定特性。但整个电力系统是非线性的,这种方法必然会产生一些纰漏。

基于非线性动态方程的分歧理论分析法,是用分叉理论将特征值和高阶多项式结合起来,从数学空间结构上来考虑系统的稳定性。基于此,可知电力系统低频振荡稳定极限是与系统微分方程发生 Hopf 分叉的情况相联系的,因此可用局部分叉理论的 Hopf 分叉来分析。

但目前此法对系统的规模及方程的阶数有所限制,故还需要进一步研究。

2.3 模态级数分析法

向量场的正则型技术将线性分析技术扩展到可以包含电力系统动态中的非线性相互作用,并成功地应用于研究非线性系统性能的各个方面。文献[25]给出了正则型技术应用于电力系统的基本步骤;文献[26,27]用 NFM(Normal Form Modal)来评估大扰动后区域间现象的发生,其基本方法后来被扩展到包含同步电机及其控制器的非线性表示;文献[28]等使用 NFM 研究一个简化的 AC/DC 系统中非线性模态相互作用的存在,这种相互作用被证明会影响发电机励磁系统的性能^[29],而且也是区间振荡模态产生的原因之一^[30]。

模态级数方法是属于非线性动态理论中的另一种分析方法,它在电力系统中的应用是崭新的,可以用来表示非线性响应和获得非线性系统零输入响应的近似闭式解表达式,而不需要非线性变换^[31]。此法能提供比正则型技术更准确的非线性近似,因为二次模态级数近似比二次正则型近似可捕获更多的非线性作用。

非线性法正好可以和小干扰分析法对应,小干扰分析法可以理解为将系统模型一阶展开,即得到线性化模型,从而进行一系列计算,却没有考虑二阶或是更高阶的模态交互作用现象,而正则型技术与模态级数正是从这个角度出发来解决问题的,把电力系统的非线性充分考虑进来,分析低频振荡的发生机理,但两方法在此方面还有待于我们进一步的研究。

2.4 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;不同的负荷特性将产生差别较大的仿真结果等等。而且由于得到的时域响应无法充分揭示出小扰动稳定问题的实质,故通常将此法与其它几种方法综合使用。

2.5 频域分析法

信号的频域分析法是将实测信号视为某些频率固定、幅值按指数规律变化的正弦信号(振荡模式)的线性组合,从而将方法归纳为对各频率(模态)与阻尼系数的识别。进而又可分为参数方法和非参数方法两类如下^[32]:

1) 参数法是通过建立参数化模型,根据实测数

据用最优化的方法求取模型参数。电力系统应用最多的是 prony 方法。但有其自身的缺点: ① 不能反应动态过程的非平稳性; ② 拟合的结果对噪声敏感。文献[33]提出当信噪比小于 40 dB 时,难以得到正确的结果。

2) 非参数法包括傅立叶算法、快速傅立叶算法(FFT)、Z 变换法和小波算法等。但各有各的优缺点。

① 傅立叶算法对噪声信号的鲁棒性很好,但不能反应阻尼特性,也不能反应频率随时间的变化。

② FFT 用了时-频分布的概念,可以处理非平稳信号,但不能根据信号自动调整时频窗口。

③ 文献[34]采用基于 Z 变换的识别算法进行在线信号的频谱分析,可通过判别频谱中极点的位置从而得到想要的振荡模,但在识别低频和弱阻尼信号时,有些困难。

④ 小波算法是分析非平稳信号的有力工具,在时域和频域都具有良好的局部分辨能力,并且对高低频信号具有自适应性。文献[35]小波变换中的脊算法根据信号自适应地调节时频窗口,能消除噪声,并能很好地反应复杂振荡过程中所包含的多个模式随时间的变化规律。

2.6 在线辨识法

此法是根据在线辨识系统频率响应函数来求系统的传递函数,根据求得的传函来分析其特征值,及极点,零点,留数,从而判断系统的振荡性质和类型。从物理概念上讲,极点反映了系统的动态行为特性,它与系统内在的振荡方式有关;而零点反映了动态系统与外部世界间的关联特性,也可认为是系统具备的反振荡特性。正是基于此,我们可以将在线辨识法与频域法充分结合,以期能得到随时间变化的阻尼模态的变化。

振荡频率的识别和预测的基础就是实时测量系统振荡频率和功角,针对此点,文献[36~38]提出了相关测量的解决方案。

文献[39]提出了一种在线评估和控制振荡阻尼的方法,是与单机等值暂态稳定分析方法(SIME)相结合的 Prony 分析方法。因为 SIME 能压缩互联电网多机系统的动态性能,使之可描述为一个单机无穷大母线的动态行为,从而使 Prony 分析用于大的实际的电力系统成为可能。

2.7 低频振荡的自激分析法^[15]

这一方法的基本思想是在被研究的 n 机电力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。

2.8 能量分析法

此法是通过分析发电机能量模态的分析,从而确定振荡过程中相互交换能量的机群,从而进行低频振荡分析^[40]。这基本上也是种等值的思想,但对于互联大电网,这种等值还存在一定困难。

2.9 模糊辨识法

此法是识别给定对象和那一类模糊样本相同或接近,也就是把模糊样本分为若干类,判别给定的对象应该属于那一类^[41]。针对低频振荡分析,即是识别系统的状态是否归属于低频振荡一类。

3 低频振荡的抑制措施

为抑制电力系统的低频振荡,从理论上讲主要可以采用以下两方面的对策,即一次系统对策和二次系统对策^[15]。其中,一次系统对策有: ① 增强网架,减少重负荷输电线; ② 采用补偿电容,减少送受端的电气距离; ③ 采用直流输电,从根本上避免功率振荡; ④ 在长距离输电线上装设 SVC(Static Var Compensator)装置,以改善系统的动态性能。二次系统的对策主要为:采用附加控制装置,并适当整定其参数以增加抑制低频振荡的阻尼力矩,从而达到抑制振荡的目的,由于这一方法具有易实现、经济效益显著等优点,所以它已成为抑制低频振荡的最主要方法。下面介绍几种电力系统中常用的或有应用前景的抑制低频振荡的主要措施:

1) 电力系统稳定控制器 PSS

PSS(Power System Stabilizer)是目前世界上使用最广泛、最经济且技术较为成熟的抑制低频振荡的措施。其基本原理是在自动电压调节 AVR(Automation Voltage Regulation)的基础上,附以转速偏差,功率偏差,频率偏差中的一种或几种信号作为附加控制,产生与同轴的附加力矩,增加对低频振荡的阻尼,以增强电力系统的动态稳定性^[42]。

但传统的 PSS 也存在一些问题,因 PSS 参数是

在某个低频振荡下设计整定的,当系统参数或运行条件改变时,低频振荡的频率也发生了改变,但 PSS 参数却没有变化,这样的控制结果必然会偏离最佳控制点。因此 PSS 不可能在所有的运行方式下都有最好的控制效果,虽然它不会恶化系统的阻尼特性,但在某些运行点上可能会激励或是恶化其它的模态,且存在激发轴系扭振和发生反调现象的危险等诸如此类的问题。

在多机系统中,发电机之间有相互作用,各机组上的 PSS 也会相互影响;而且多机系统中低频振荡的模式一般不止一个,每一种低频振荡模式都与一定的系统结构和运行方式相适应。研究证明,多机系统中的某些发电机对某一种低频振荡模式起决定性作用。因此在多机系统中应用 PSS 需解决的问题主要有两个:①PSS 的安装地点的选择;②PSS 参数的协调整定。只有当 PSS 安装在合适的发电机并采用适当的参数,PSS 对系统的低频振荡才有较好的控制效果。

2) 电力系统智能稳定控制器

正是由于对于多机电力系统而言,PSS 需要解决地点选择及参数整定两大问题,人工智能的出现,刚好可以较好地解决这一问题。

采用模糊技术来设计新的电力系统稳定器^[43-45],从而可以不依赖于被控对象的精确数学模型,避免传统 PSS 设计需要基于精确的数学模型的特点,同时也避开了自适应型 PSS 需要在线辨识系统的数学模型的特点。基于模糊技术的 PSS 能够较好的适应电力系统的非线性特性,并能够具有较强的鲁棒性、较好的控制效果,但也有一些明显的不足,如模糊规则的设定和控制器参数的整定,实现很难。

鉴于模糊 PSS 具有弱点,一种应用于 PSS 的设计之中全新的模糊神经网络技术就应运而生^[46-48]。这一技术就是借助于模糊技术的无须依赖精确的系统模型的特点和神经网络技术的自学习、自推理等特性,从而可以得到一种既不依赖于系统精确数学模型又具有良好自适应、自学习特性的控制性能良好的 PSS。文献[46]介绍了一种基于模糊逻辑的自适应 PSS 的设计方法,通过这一方法设计出的 PSS 具有结构简单、适应性强、鲁棒性好等特点,在未来的大规模互联电力系统中具有较好的应用前景。

3) 采用 SVC、HVDC、FACTS 装置等设备

采用这些设备目的是从系统结构、负载特性以及运行方式几方面来改善系统的阻尼性能,从而达到抑制低频振荡的目的。目前这些方法国内外已经

有了很深入的研究,以后的研究方向应着眼于将传统控制手段与 FACTS 和直流输电系统相互结合进行协调控制。

4) 采用广域测量信号(WAMS)进行阻尼控制

WAMS 采用同步相量测量单元(PMU)可同步采集表征电网运行状态的几乎所有的变量,最为关键的是,能测量发电机内电势、转子角、角速度、母线电压相位等与低频振荡密切相关的量。而且 PMU 采集的带时标的的数据能以较小的延时传递到调度,并完成数据处理和分析^[49-51]。基于此,为克服现有的阻尼控制的固有缺陷创造了条件:

a. 可在一定时延内获得机组间的相对功角和角频率,将其作为阻尼控制器的反馈输入构成闭环控制,这在国内外的 WAMS 应用工程中已得到证明^[52,53]。

b. 可向分散布置的阻尼控制器提供全局信息,使其能有效地抑制本地振荡和区域间振荡。

c. 数据中心或调度端实时获取系统当前的运行状态,分析其振荡模式,进而动态优化各分散阻尼控制器的参数,实现自适应式的全局协调型阻尼控制系统。

目前国内外在这方面的主要研究还集中在可行性论证和仿真分析方面,这也是我们研究的方向。

5) 通过再调度发电机发电进行阻尼控制

此法是基于改变系统的运行点进行控制,从而解决低频振荡问题。文献[54]中提出了一种应用灵敏度分析法的再调度发电机发电的控制方法,此法能提高电网间联络线的传输功率,从而避免低频振荡发生,以提高系统稳定性^[55]。

4 低频振荡研究中亟需解决的几个问题

随着互联电网规模越来越大,越来越复杂,为了保障整个电网的安全可靠运行,必须要做到能够实时监控电网的运行状况,并能及时采集到所需信息。为此,以下几个方面将是我们研究的重点:

1) 结合我国实际的电力系统分析,当电网具有长链形结构和弱联络线,及区域功率不平衡、主电站备用功率裕度不充分等不利条件时,系统的同步转矩系数尤其是阻尼转矩系数将受何影响,进而可以找出引发系统“超低频振荡”的可能机理。

2) 采用模态级数法研究互联电网遭受扰动后的动态行为,分析系统的振荡模态以及非线性模态的相互作用,以期能找到引发“超低频振荡”的物理本质。

3) 发展新的分析方法,实现低频振荡的在线甚至实时分析,并与 SCADA 及 EMS(Energy Management System) 互联,使全网运行状态尽在运行管理人员的掌握之中,便于紧急情况下实施控制。

4) 引入 FACTS 元件,通过选择其合适的参数以整定协调系统元件参数,从而抑制低频振荡。

5) 在分析和时域仿真中,要考虑负荷模型对系统阻尼的影响。应该综合考虑负荷的静态特性和动态特性。

6) 发展智能稳定控制器,采用人工智能等方法考虑互联网中多 PSS 之间如何进行参数的协调整定,使之能更好的抑制复杂电网的超低频振荡。

5 结语

随着我国超大规模互联网电网的形成,电网结构越来越复杂,发生的“超低频振荡现象”的机理也越来越引起人们的重视,所以研究过程中要充分考虑系统本身的特性,即其具有的非线性性,因此在建立在线低频振荡监控系统的同时,要结合采用基于动态理论的非线性分析方法,文中提到的一些方法值得参考和借鉴;而且随着计算机技术,基于 GPS 的 WAMS 等新通信技术的发展,综合各种分析方法,找出“超低频振荡”的机理并采取相应的抑制措施应该是完全可能的。

参考文献:

- [1] Klein M, Rogers G J, Kundur P. A Fundamental Study of Inter-area Oscillations in Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(3): 914-921.
- [2] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2003.
WANG Xi-fan, FANG Wan-liang, DU Zheng-chun. The Analysis of Modern Power System [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [3] Demello F. Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(4): 316-329.
- [4] 王铁强,贺仁睦,等. 电力系统低频振荡机理的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 21-25.
WANG Tie-qiang, HE Ren-mu, et al. The Mechanism Study of Low Frequency Oscillation in Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 21-25.
- [5] Dobson I, Zhang Jian-feng, Greene S, et al. Is Strong Modal Resonance a Precursor to Power System Oscillations [J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 2001, 48(3): 340-349.
- [6] 王敏. 电力系统低频振荡的原因与对策 [J]. 广东水利水电职业技术学院学报, 2004, 2(1): 25-27.
WANG Min. Causes and Countermeasures of Low Frequency Oscillation in Power System [J]. Journal of Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, 2004, 2(1): 25-27.
- [7] 余浩,刘瑞叶,陈学允. 利用适应型励磁控制抑制局部小电力系统低频振荡 [J]. 电力系统自动化, 1998, 22(9): 65-67.
YU Hao, LIU Rui-ye, CHEN Xue-yun. Suppression of Low-frequency Oscillation in Local Power System by Adaptive Excitation Control [J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(9): 65-67.
- [8] 邓集祥,刘洪波,边二曼. 低频振荡中的 Hopf 分歧研究 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 391-394.
DENG Ji-xiang, LIU Hong-bo, BIAN Er-man. Study on Hopf Bifurcation in Low Frequency Oscillation [J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 391-394.
- [9] Tan C W, Varghese M, Varaiya P, et al. Bifurcation, Chaos, and Voltage Collapse in Power Systems [J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(11): 1484-1496.
- [10] 刁士亮,柳中莲. 同步发电机模型与电力系统稳定分析 [M]. 广州:华南理工大学出版社, 1989.
DIAO Shi-liang, LIU Zhong-lian. Modal of Synchronous Machines and Power System Stability Analysis [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1989.
- [11] 檀斌,薛禹胜. 多机系统混沌现象的研究 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(2): 3-8.
TAN Bin, XUE Yu-sheng. A Study on Chaos of Multi-machine Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(2): 3-8.
- [12] 贾宏杰,余贻鑫,王成山. 电力系统混沌现象及相关研究 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 26-30.
JIA Hong-jie, YU Yi-xin, WANG Cheng-shan. Chaotic Phenomena in Power System and Its Studies [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 26-30.
- [13] Chiang H D, Liu C W, Varaiya P P, et al. Chaos in a Simple Power System [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(4): 1407-1417.
- [14] Kao Wen-shiow. The Effect of Load Models on Unstable Low-frequency Oscillation Damping in Taipower System Experience w/wo Power System Stabilizers [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(3): 463-472.
- [15] 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.
- NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. The Theory and Analysis of Dynamic Power System[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2002.
- [16] Lee Y C, Wu C J. Damping of Power System Oscillations with Output Feedback and Strip Eigenvalue Assignment [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 1620-1626.
- [17] Ooi B T, Nishimoto M. Analytical Structures for Eigen-system Study of Power Flow Oscillations in Large Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3(4): 1609-1615.
- [18] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1993.
- [19] 王洪涛,刘玉田,雷鸣,等. 电网互联对山东电网内部低频振荡模式的影响[J]. 中国电力, 2004, 37(6): 12-15.
WANG Hong-tao, LIU Yu-tian, LEI Ming, et al. Affection of Interconnection on Low Frequency Oscillation Modes in Shandong Power System[J]. Electric Power, 2004, 37(6): 12-15.
- [20] 徐贤,万秋兰. 低频振荡模式选择法的再改进[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(17): 23-25.
XU Xian, WAN Qiu-lan. Re-modified SMA Method for Power System Low-frequency Oscillation Analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17): 23-25.
- [21] Byerly R T, Bennon R J, Sherman D E. Eigenvalue Analysis of Synchronizing Power Flow Oscillations in Large Electric Power Systems[J]. IEEE Trans on PAS, 1982, 101: 235-243.
- [22] Arnoldi W E. The Principle of Minimized Iterations in the Solution of the Matrix Eigenvalue Problem[J]. Quart Appl Math, 1951, 9: 17-29.
- [23] Saad Y. Variations on Arnoldi's Method for Computing Eigenelements of Large Unsymmetric Matrices[J]. Linear Algebra and Its Applications, 1981, 34(7): 184-198.
- [24] Abed E H, Varaiya P. Nonlinear Oscillations in Power Systems[J]. Electric Power and Energy System, 1984, 6(1): 37-43.
- [25] Fouad A A, Vittal V, Kliemann W, et al. Analysis of Stressed Interconnected Power Networks [J]. Electric Power Research Institute Report, 1994, TR-103: 704.
- [26] Thapar J, Vittal V, Kliemann W. Application of Normal Form of Vector Fields to Predict Inter-area Separation in Power Systems[J]. IEEE Trans on PWRS, 1997, 12(5): 844-850.
- [27] Vittal V, Bhatia N, Fouad A A. Analysis of the Inter-area Mode Phenomenon in Power System Following Large Disturbances [A]. IEEE/PES 1991 Winter Meeting. New York(USA): 1991.
- [28] Ni Y, Vittal V, Kliemann W, et al. Nonlinear Modal Interaction in HVDC/AC Power Systems with DC Power Modulation[J]. IEEE Trans on PWRS, 1996, 11(11): 2011-2017.
- [29] Lin C M, Vittal V, Kliemann W, et al. Investigation of Modal Interaction and Its Effects on Control Performance in Stressed Power Systems Using Normal Forms of Vector Fields[J]. IEEE Trans on PWRS, 1996, 11(5): 781-787.
- [30] Vittal V, Bhatia N, Fouad A A. Analysis of the Inter-area Mode Phenomena in Power Systems Following Large Disturbances[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(4): 1515-1521.
- [31] Pariz N, Shانهchi H M. Explaining and Validating Stressed Power Systems Behavior Using Modal Series [J]. IEEE Trans on PWRS, 2003, 18(2): 778-785.
- [32] 张鹏飞,薛禹胜,张启平. 电力系统时变振荡特性的小波脊分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 32-35.
ZHANG Peng-fei, XUE Yu-sheng, ZHANG Qi-ping. Power System Time-varying Oscillation Analysis with Wavelet Ridge Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 32-35.
- [33] Grund C E, Paserba J J, Hauer J F, et al. Comparison of Prony and Eigenanalysis for Power System Control Design[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 964-971.
- [34] Bounon M, Lefebvre S, Malhame P P. A Spectral Algorithm for Extracting Power System Modes from Time Recordings[J]. IEEE Trans on PWRS, 1992, 7(2): 665-672.
- [35] Delprat N, Escudie B, Guillemain P, et al. Asymptotic Wavelet and Gabor Analysis; Extraction of Instantaneous Frequencies [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(2): 644-664.
- [36] 何奔腾,金华锋. 电力系统振荡频率的实时估算[J]. 电力系统自动化, 2002, 24(15): 32-36.
HE Ben-teng, JIN Hua-feng. Real-time Estimation of Power System Oscillation Period[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 24(15): 32-36.
- [37] 许庆强,索南加乐,宋国兵,等. 振荡时电力系统瞬时频率的实时测量[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 51-54.
XU Qing-qiang, SUONAN Jia-le, SONG Guo-bing, et al. Real-time Measurement of Power System Instantaneous Frequency While Power System Swings [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 51-54.
- [38] 陈朝晖,黄少锋,杨奇逊. 基于综合相量的电力系统振

- 荡频率实时测量[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 32-35.
- CHEN Chao-hui, HUANG Shao-feng, YANG Qi-xun. Real-time Measurement of the Power Swing Frequency Based on the Generalized Phasor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(4): 32-35.
- [39] Ruiz-Vega D, Messina A R, Pavella M. Online Assessment and Control of Transient Oscillations Damping[J]. IEEE Trans on PWRs, 2004, 19(2): 1038-1047.
- [40] Jing C, Mccalley D, Kommatreddy M. An Energy Approach to Analysis of Inter-area Oscillation in Power System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 734-740.
- [41] 绍俊松, 李庚银, 周明. 电力系统低频振荡分析及振荡解列策略研究综述[J]. 电力情报, 2000.
- SHAO Jun-song, LI Geng-yin, ZHOU Ming. The Survey on Low Frequency Oscillation Analysis of Power System and Strategy of Oscillation Splitting[J]. Information on Electric Power, 2000.
- [42] 刘溟. 互联网低频振荡分析及其对策的探讨[J]. 华中电力, 2002, 15(4): 14-17.
- LIU Ming. Discussion on Low Frequency Oscillation of Inter-linking Power Grids[J]. Huazhong Electric Power, 2002, 15(4): 14-17.
- [43] Hiyama T. Rule-based Stabilizer for Multi-machine Power System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2): 403-411.
- [44] Hiyama T, Oniki S, Nagashima H. Evaluation of Advanced Fuzzy Logic PSS on Analog Network Simulator and Actual Installation on Hydro Generators[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1996, 11(1): 125-131.
- [45] Hiyama T. Damping of Multi-mode Oscillations Using Integrated Fuzzy Logic Generator Controller[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power Systems Control, Operation and Management. Hong Kong: 1997. 77-82.
- [46] 高峰, 秦翼鸿. 基于模糊神经网络的模糊控制器综合优化设计 II. 模糊电力系统稳定器[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(12): 1-3.
- GAO Feng, QIN Yi-hong. Synthetic Optimum Design of Fuzzy Controller Using Fuzzy Neural Network Part II: Fuzzy PSS[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(12): 1-3.
- [47] Hariri A, Malik O P. A Fuzzy Logic Based Power System Stabilizer with Learning Ability[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1996, 11(4): 721-727.
- [48] 叶其革, 王晨皓, 吴捷. 基于自组织模糊神经网络电力系统稳定器的设计[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(5): 687-690.
- YE Qi-ge, WANG Chen-hao, WU Jie. Design of Self-organizing Power System Stabilizer Based on Fuzzy Neural Network[J]. Control Theory and Applications, 1999, 16(5): 687-690.
- [49] 韩英铎, 王仲鸿, 林孔兴, 等. 电力系统中的三项前沿课题——柔性输电技术, 智能控制, 基于 GPS 的动态安全分析与监测系统[J]. 清华大学学报, 1997, 37(7): 1-6.
- HAN Ying-duo, WANG Zhong-hong, LIN Kong-xing, et al. Three New Front Subjects in Power Systems——FACTS, Intelligent Control and Dynamic Security Analysis and Monitor System Based on GPS[J]. Journal of Tsinghua University, 1997, 37(7): 1-6.
- [50] Kainwa I, Grondin R, Hebert Y. Wide-area Measurement Based Stabilizing Control of Large Power Systems a Decentralized/Hierarchical Approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 136-153.
- [51] Aboul-Ela M E, Sallam A A, McCalley J D, et al. Damping Controller Design for Power System Oscillation Using Global Signals[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 767-773.
- [52] Hauer J F. Validation of Phasor Calculations in the Macro-dyne PMU for California-oregon Transmission Project Tests of March 1993[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3): 1224-1231.
- [53] 罗建裕, 王小英, 鲁庭瑞, 等. 基于广域测量技术的电网实时动态监测系统应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(24): 78-80.
- LUO Jian-yu, WANG Xiao-ying, LU Ting-rui, et al. Application of Real-time Dynamics Monitoring System of Power Network Based on Wide-area Measurement Technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(24): 78-80.
- [54] Wang L, Chung C Y. Increasing Power Transfer Limits at Interfaces Constrained by Small-Signal Stability[A]. Presented at IEEE PES Winter Meeting Panel Session on Recent Applications of Small Signal Analysis Techniques. New York: 2002.
- [55] Alvarado F, DeMarco C, Dobson I, et al. Avoiding and Suppressing Oscillations[Z]. Pserc Final Report, 1999.

收稿日期: 2004-12-02; 修回日期: 2005-01-19

作者简介:

刘 隽(1979-), 女, 博士研究生, 从事电力系统稳定和控制等方面的研究工作; E-mail: jiaqi1018-79@163.com

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

(下转第 84 页 continued on page 84)

- [36] 黄民翔,赵学顺,倪波,等. 市场电价的实证分析及预测建模[J]. 电力系统自动化,2003,27(19):16-20.
HUANG Min-xiang, ZHAO Xue-shun, NI Bo, et al. Forecasting on Market-clearing Price Base on Bidding Curve Driven Model [J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(19):16-20.
- [37] Kim Chang-il, Yu In-keun, Song Y H. Prediction of System Marginal Price of Electricity Using Wavelet Transform Analysis[J]. Energy Conversion and Management,2002,43(14):1839-1851.
- [38] 张建,马光文,杨东方,等. 边际电价预测的三时点模型[J]. 水电能源科学,2003,21(2):87-88.
ZHANG Jian, MA Guang-wen, YANG Dong-fang, et al. Model Three Time Points for System Marginal Price Forecasting[J]. Water Resources and Power,2003,21(2):87-88.
- [39] 马歆,侯志俭,蒋传文,等. 基于组合灰色神经网络模型的电力远期价格预测[J]. 上海交通大学学报,2003,37(9):1329-1332.
MA Xin, HOU Zhi-jian, JIANG Chuan-wen, et al. Electricity Forward Price Forecasting Based on Combined Gray Neural Network Model [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2003,37(9):1329-1332.

收稿日期: 2004-11-30

作者简介:

苏娟(1980-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统自动化和电力市场; E-mail: Sujuan@cau.edu.cn

杜松怀(1963-),男,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为电力系统自动化和电力市场;

周兴华(1978-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统自动化和电力市场。

Review of development of spot price forecasting methods in electricity markets

SU Juan, DU Song-huai, ZHOU Xing-hua

(China Agriculture University, Beijing 100083, China)

Abstract: Electric power industry is undergoing a process of innovation from regulation to market operation. Electricity price was no longer determined directly by government, and was formed under condition of market mechanism. The fluctuation of electricity price will affect the profit of market participants. It is very important for market participants to accurately forecast the price. In this paper, the methods of spot price forecasting and their technical development were detailed. The types, forecasting principle, advantages and disadvantages, and the application of price forecasting methods in electricity markets were summarized.

Key words: electricity market; spot price; price forecasting

(上接第77页 continued from page 77)

Research and problems of low frequency oscillation in interconnected power networks

LIU Jun¹, LI Xing-yuan¹, ZOU Quan-ping², CHEN Shu-heng¹, HE Chao-rong

(1. Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Shenyang Engineering College, Shenyang 110316, China)

Abstract: This paper reviewed mechanism, analysis methods, control measures of low frequency oscillation and its exiting problems in power system. An online monitoring system of low frequency oscillation based on Wide Area Measurement System (WAMS) was presented. The trends were indicated to combine the spectral algorithm with Prony algorithm for researching the oscillation modes of system, and to apply a novel method-modal series method, for analyzing the mechanism of "the super low frequency oscillation" in interconnected power networks.

Key words: interconnected power networks; low frequency oscillation; super low frequency oscillation; wide area measurement system; modal series method