

浅谈电力系统低频振荡的产生机理、分析方法及抑制措施

李强, 袁越, 周海强

(河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 随着电力工业的迅猛发展, 电力系统的规模越来越大, 在获得更高的可靠性和经济性的同时, 大型互联电力系统的低频振荡严重危及了系统的安全运行。该文简要介绍了电力系统低频振荡的产生机理和常用分析方法, 也给出了低频振荡的抑制措施, 并指出了未来的发展方向。

关键词: 低频振荡; 特征值分析; 电力系统稳定器

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)09-0078-07

0 引言

随着互联电力系统的规模日益增大, 系统互联引发的低频振荡问题已成为危及电网安全运行、制约电网传输能力的最主要因素之一。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 (Inter-area Modes)。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 $1 \sim 2$ 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 $0.1 \sim 0.7$ Hz 之间^[2]。

电力系统的低频振荡在国内外均有发生, 当系统中的发电机经输电线并联运行时, 不可避免的扰动会使各发电机的转子相对摇摆, 若系统阻尼不足就会引起持续振荡。基于发电机转子的惯性时间常数较大, 故振荡频率较低, 这就是低频振荡的来源。低频振荡 (又称功率振荡或机电振荡) 常发生在长距离、重负荷输电线上, 特别是在采用快速高放大倍数的励磁系统中更容易出现功率振荡^[2]。系统发生低频振荡以后会产生两种结果: 一是振荡的幅值持续增长, 使系统的稳定遭到破坏, 甚至引起系统解列; 二是振荡的幅值逐步减小, 或通过恰当的措施平息振荡。因此, 对电力系统低频振荡的机理进行研究, 并采取相应的抑制措施具有十分重要的意义。

近 40 年来, 电力工作者在低频振荡这一领域取得了丰硕的成果, 不仅提出了详细完整的分析方法, 也提出了许多有效的控制方法, 为未来更大规模系统的互联奠定了基础。

1 低频振荡的产生机理

在低频振荡研究领域, 世界各国的专家、学者提出了一些不尽相同的低频振荡产生机理, 主要的观点有以下几种:

1.1 欠阻尼机理

自 F. Demelb 在文献 [3] 中最先提出低频振荡的欠阻尼机理后, 学术界逐渐取得了共识。这一理论认为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就是当扰动的频率与系统固有频率相同时, 系统可能产生共振型的欠阻尼低频振荡。文献 [5] 指出, 若系统阻尼为零或者较小, 则由于扰动的影响而出现不平衡转矩, 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。共振机理的低频振荡归根结底还是由于系统阻尼不足而引起, 因此, 笔者将其归入欠阻尼情形。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。

1.2 发电机的电磁惯性引起的低频振荡

文献 [6] 指出, 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荡。

这种电磁惯性引起的低频振荡具体会在什么条件下产生, 目前尚无定论, 也鲜见有关这方面的文

献。所以这一研究方向还有待广大电力系统领域的专家学者进行进一步的研究。

1.3 非线性奇异现象 (也称为分歧现象)^[7~12]

电力系统的分歧有静态分歧和动态分歧两种情况,其中静态分歧是由于系统潮流方程的多解而出现的,而动态分歧包括 Hopf 分歧、循环往复式分歧和倍周期分歧,它们的产生机理各不相同,具体参见相关文献^[7]。

20世纪80年代中期,Abad和Varaiya首先揭示了电力系统中的非线性奇异现象,并指出这种现象是由于 Hopf 分歧引起的^[7]。所谓 Hopf 分歧就是对非线性系统 $\dot{X} = F(x, \mu)$ ($x \in R^n$, $n \geq 2$, $\mu \in R$ 均为系统参数)而言,首先将其在平衡点处展开得 $\dot{X} = Ax + F(x, \mu)$, 其中 $A = \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_x = 0$, $F(x, \mu) = F(x, \mu) - Ax$, 则当 μ 变化时,非线性系统 $\dot{x} = F(x, \mu)$ 可能从一种响应跃变为另一种响应,我们称联结这两种响应的现象为分歧。如果是从 Lyapunov 意义下的稳定性态突然跃变为非线性振荡,则这两种响应之间的分歧就是 Hopf 分歧。

文献[9,10]根据 Hopf 分歧理论,指出系统在临界点附近发生亚临界分歧的条件是临界点处的曲率系数 > 0 , 从而系统的动态行为出现了奇异,即特征根仍在虚轴左侧时系统就开始不稳,出现了增幅性的低频振荡,此时稳定域由于亚临界分歧的出现而变小,不稳定区域扩展到了左半平面;若参数的变化使得临界点的曲率系数 < 0 , 则系统将会由 Lyapunov 意义下的增幅不稳定振荡跃变为轨道稳定的非线性振荡,即为超临界分歧。所以我们可以看出,分歧点的曲率系数决定分歧后系统的运行轨迹。文献[10]通过实例验证得出,在各种运行方式下,若励磁系统参数变化时,系统出现的都是亚临界分歧,即系统的稳定域变小。

1.4 混沌振荡机理^[13~15]

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。目前人们只是感性地认识到混沌现象的一些典型特征,比如混沌系统对初始点的敏感依赖性,这种敏感依赖性是指任意两条运行轨道无论其初始点如何接近,其运行轨迹都将随时间变化而截然不同。文献[13]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。

文献[14]提出了产生混沌现象的两种途径:

(1)连续倍周期分岔导致混沌;(2)经由初始能量直接激发混沌。所谓连续倍周期分岔导致混沌就是指系统由最初的单周期分岔出现倍周期、接着出现4倍周期分岔,然后8倍周期分岔……,如此下去导致的混沌现象。而当发电机的角速度偏差达到某一值时,系统收敛到混沌吸引子上,若发电机的角速度偏差继续变大时,系统最终的状态将由奇异吸引子控制,这种混沌就是经由初始能量直接激发的混沌。

总之,上面的几种观点,都从某一方面解释了低频振荡的发生机理,但鉴于电力系统本身的复杂性和非线性特性,所以到目前为止对电力系统低频振荡这一现象的根本原因尚无定论,有待本领域的广大科研人员进一步探讨。

2 常用的分析方法

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歧理论分析法、时域仿真。

2.1 基于线性化理论的特征值分析法

2.1.1 低频振荡的全部特征值分析法^[16~18]

所谓全部特征值分析法就是:首先通过变换形成全系统的线性化状态方程 $\dot{X} = AX$, 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^[16]。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”现象,因而是不可行的^[19]。

2.1.2 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 (和) 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。

文献[16]中还介绍了改进 SMA 法,其基本思想如下:(1)先形成降阶系统 $\dot{X} = A_r(p) X_r$, 则其特征值 λ 和特征向量 u 应满足等式 $[I - A_r(\lambda)]u = 0$; (2)将 $A_r(\lambda)$ 在 $\lambda = \lambda^{(j)}$ 处按泰勒级数形式展开,则可得:

$$\left\{ \begin{matrix} (j+1) \\ I - [A_r(p) + \frac{\partial A_r(p)}{\partial p} \Big|_{(j)}] \end{matrix} \right\} u^{(j+1)} = 0$$

即得:

$$(j+1) I - A_r^* (p) \Big|_{(j)} u^{(j+1)} = 0$$

其中: $A_r^* (p) \Big|_{(j)} = (I - \frac{\partial A_r(p)}{\partial p} \Big|_{(j)})^{-1} (A_r(p) -$

$$\frac{\partial A_r(p)}{\partial p} \Big|_{(j)})$$

这一改进的 SMA 法不仅具有牛顿法的二阶收敛速度,而且不必形成原高阶系统的系数矩阵 A 而仅需形成降阶系数矩阵 $A_r(p)$,从而大大节省机时。此外,在形成 $A_r(p)$ 的过程中,励磁、调速系统的传递函数均得以保留,从而可以为调节器的参数设置提供重要信息。

不过,改进的选择模式分析法存在着丢根和迭代,可能收敛到非机电模式的情况。鉴于这一缺陷,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,巧妙地避开改进的 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,从而有效地避免丢根和收敛到非机电模式的情形。

2.1.3 低频振荡全维部分特征值分析法

文献 [21] 指出,这一方法就是将全系统微分方程的系数矩阵 A 变换成维数与之相同的另一矩阵 A',使 A'中所关心的一个或一小部分特征值变成 A 中最大的一个或几个特征值,然后通过合适的计算方法得出 A'的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。

2.1.4 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 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^[16]。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。

2.2 基于非线性动态方程的分歧理论分析法和时域仿真

2.2.1 Hopf 分歧理论分析法

系统发生 Hopf 分歧后,需要求解的问题是: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^[22]。文献 [12] 提出了采用复变量的方法对高维非线性空间进行约化,并用数值方法避开解析求导,在一阶偏导基础上直接计算相关的 2 阶、3 阶偏导数,求得了曲率系数,成功完成了多机电力系统非线性振荡的研究分析。

2.2.2 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^[23]。

此外,文献 [24] 还提出了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。

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^[16]。其中,一次系统对策主要有:减少重负荷输电、减少送受端的电气距离、采用直流输电以及在输电线上装设 FACTS (Flexible AC Transmission System) 元件。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。下面介绍几种目前电力系统中采用的或有应用前景的抑制低频振荡的主要措施:

3.1 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,附加转速偏差 $\Delta \omega$ 、功率偏差 P_e 、频率偏差 f 中的一种或几种信号作为附加控制,产生与 $\Delta \omega$ 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^[25]。

按照附加控制信号的不同,常见的电力系统稳

定控制器可以分为如下几种^[26]: 基于 ω 的 PSS; 基于 P_e 和 ω 的 PSS; 基于 f 的 PSS。这几种 PSS 就可以分别依靠不平衡转速、不平衡功率以及频率来调节自动电压调节系统的输入信号, 实践证明这是一种非常有效的控制方法。

由于 PSS 的参数是针对系统的某一特定频率而进行整定的, 所以当系统运行状态改变时, 控制结果必然会偏离最佳控制点, 甚至会在某些运行点上存在着激发轴系扭振和使系统阻尼减小的危险。因此, 在多机系统中应用 PSS 需要解决的问题主要有两个:

PSS 安装地点的选择^[27]; PSS 参数的协调整定^[28]。这也是今后有待进一步研究的一个课题。

3.2 采用 FACTS 元件抑制低频振荡

我们知道, FACTS 元件在维持系统中某点电压水平、提高电力系统暂态稳定性和抑制系统功率振荡等方面已经取得广泛应用。传统的 FACTS 控制方式是以维持系统某节点的电压等为目标, 但许多研究结果表明, 较强的电压控制将降低 FACTS 向系统提供阻尼的能力, 因此 FACTS 的控制目标不仅应包括维持系统某点电压给定值, 还应保证向系统提供正阻尼, 只有这样才能确保它们提高系统的暂态稳定性。

文献 [29] 指出, 当一个系统中存在有多个 FACTS 元件时, 由于各元件之间的响应时间、安装位置及控制目标的差异, 它们之间会相互作用。因此, 协调它们之间的控制显得尤为必要。基于反馈控制的思路, 该文同时也指出, 当对某一 FACTS 元件进行控制时可以将其它 FACTS 所在线路或节点的相关信息送到指定 FACTS 的控制部分作为参考信息; 也可以将其它 FACTS 控制器的相关输出信息引入到某个 FACTS 元件控制器的输出部分, 并将信息进行组合输出。

在现代大型互联电网中, 如何对众多的 FACTS 元件进行协调控制, 以使整体性能达到最优, 是一个亟待解决的问题。文献 [30] 针对这一问题, 提出了采用非线性最优变目标策略来协调所有控制器。所谓最优变目标策略就是指将系统大扰动后的动态过程分为两个控制阶段, 每一阶段分别设定自己的控制目标, 求取系统趋向最优目标时所对应的控制变量值来对各个控制器实施控制, 整体即达最优。目前, 这类问题的研究还仅局限在简化的较小系统模型中进行。

3.3 电力系统智能稳定控制器

由于人工智能技术的迅速发展, 促成了人工智

能稳定器的出现。通过前面的讨论已经知道: 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, 将能较好地解决这一问题。

我们知道电力系统是一个复杂的非线性系统, 而神经网络恰好在解决大规模非线性问题上具有突出的优点^[31~34], 首先 ANN (Artificial Neural Network) 具有快速的并行处理能力; 其次 ANN 具有非线性特性; 再次能够通过样本训练, 具有自适应能力。文献 [34] 介绍了一种基于 ANN 的“在线自学习算法”, 结果表明这一方案在增加系统阻尼、抑制低频振荡方面具有较好的效果。在智能 PSS 领域, 近年来的另一个研究热点就是采用模糊技术来设计新的电力系统稳定器^[35~37], 这样就可以不依赖于被控对象的精确数学模型, 从而避免传统 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 能够较好地适应电力系统的非线性特性, 具有较强的鲁棒性、较好的控制效果, 但也存在一些明显的不足, 例如模糊规则的设定和控制器参数的整定等, 使得这类控制器难以成为未来的主流。

鉴于模糊 PSS 具有上述致命的弱点, 科研人员考虑将模糊技术和神经网络技术结合起来, 从而将一种全新的模糊神经网络技术应用到 PSS 的设计之中^[38~40]。这一技术是借助于模糊技术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、自推理等的特性, 从而得到一种既不依赖于系统精确的数学模型又具有良好的自适应、自学习特性的控制性能良好的 PSS。文献 [38] 详细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。

在实际的大型电力系统中, 通常装设了较多的 PSS 和 FACTS 元件, 而无论如何设定装置的参数, 都存在在抑制某一主振模态的同时却恶化另一模态的情形。因此, 如何协调这些装置的工作状态就成为亟待解决的问题。通常, 这类问题是借助优化的方法来解决的, 我们可以考虑设定一个目标函数^[41]: $J = \max / \min (\lambda_i)$, 其中 $\lambda_i = -\zeta_i / \sqrt{\zeta_i^2 + \omega_i^2}$ 为系统状态方程系数矩阵 A 的第 i 个特征根所对应振荡模式的阻尼比, 当目标函数趋向最优时可以求得控制器的控制变量, 按照求出的结果来协调控制装

置能从一定程度上减小模态交互的负作用。文献[42]提出了采用序优化和遗传算法相结合的方法来解决阻尼控制器的协调整定问题,将控制器的协调整定归结为一个多参数优化问题,并通过仿真验证了该方法的可行性。

4 展望

由于 FACTS等技术的发展,电力系统的输电容量越来越接近其运行极限,加之区域电网的互联,低频振荡问题日益突出,对电力系统的安全运行构成了很大威胁,因此这方面的研究将是未来的重要方向之一,针对目前存在的问题和电力系统的发展方向我们可以看出未来的研究重点将集中在以下几个方面:

1) 发展智能稳定控制器。目前这方面的工作还处于实验阶段,下一步要开发出实用的、经济效益高的智能控制系统,实现对大规模互联系统的智能化稳定控制,为全国联网打下坚实的基础。

2) 发展基于广域测量系统 WAMS (Wide Area Measurement System) 的电力系统稳定控制装置。利用 WAMS 的信息尤其是功角信息来分析提取系统振荡的特征参数,这样就能够得出我们最感兴趣的系统运行模式,通过常用的实测信号分析方法如傅氏算法、离散快速傅立叶变换、小波分析等,进行振荡模式和振荡起源的分析,以设计出基于 WAMS 的 PSS。

3) 发展新的算法,实现低频振荡的在线实时分析,并与 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) 由于 FACTS 元件的引入,电网越来越接近于运行极限,增大了低频振荡的发生几率,但如果 FACTS 元件参数合适,它也能抑制低频振荡的发生,因此如何整定系统中各控制元件的参数以使系统稳定运行,也将是未来的一个研究热点。

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] Trudnowski D J, Donnelly M K, Hauer J F. A Procedure for Oscillatory Parameter Identification [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(4): 2049-2055.
- [5] 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.
- [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] 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.
- [8] Abed E H, Varaiya P, et al Nonlinear Oscillations in Power Systems [J]. Electric Power and Energy System, 1984, 6(1): 37-43.
- [9] 邓集祥,刘洪波,边二曼. 低频振荡中的 Hopf 分岔研究 [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.
- [10] 邓集祥,马景兰. 电力系统中非线性奇异现象的研究 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(22): 1-4.
DENG Ji-xiang, MA Jing-lan Study on Nonlinear Singularity Phenomenon of Low Frequency Oscillation in Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(22): 1-4.
- [11] 马景兰,朱维新,张永丽. 电力系统非线性奇异现象的研究 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(2): 1-3.
MA Jing-lan, ZHU Wei-xin, ZHANG Yong-li Study on Nonlinear Singularity Phenomenon of Low Frequency Oscillation in Power System [J]. Proceedings of the EPSA, 2002, 14(2): 1-3.
- [12] 邓集祥,刘洪波. 多机电力系统非线性振荡的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 67-70.
DENG Ji-xiang, LIU Hong-bo Study on Nonlinear Oscillation in Multimachine Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 67-70.
- [13] 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-mar-

- chine Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (2): 3-8
- [14] 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
- [15] 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.
- [16] 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
- [17] 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
- [18] Ooi O 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
- [19] 刘玉田,王春燕. 浅谈电力系统低频振荡 [J]. 山东电力技术, 1996, (6): 23-27.
LU Yu-tian, WANG Chun-yan A Brief Review on Low Frequency Oscillation in Power Systems[J]. Shandong Electric Technology, 1996, (6): 23-27.
- [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, et al Eigenvalue Analysis of Synchronizing Power Flow Oscillation in Large Electric Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1982, (1): 235-243.
- [22] 马景兰,张永丽,万京生. 分歧理论及其在电力系统稳定分析中的应用 [J]. 北京石化学院学报, 2002, 10 (1): 1-4.
MA Jing-lan, ZHANG Yong-li, WAN Jing-sheng Bifurcation Theory and Its Application in Analyzing the Stability of Power System [J]. Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Tech, 2002, 10 (1): 1-4
- [23] 张晓明,庞晓艳,等. 四川电网低频振荡及其控制措施 [J]. 中国电力, 2000, 33 (6): 36-39.
ZHANG Xiao-ming, PANG Xiao-yan, et al Low Frequency Oscillation and Its Control in Sichuan Power Network [J]. Electric Power, 2000, 33 (6): 36-39
- [24] Jing C, McCalley D, Kommateddy M. An Energy Approach to Analysis of Inter-area Oscillation in Power System [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11 (2): 734-740
- [25] 刘溟. 互联电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]. Central China Electric Power, 2002, 15 (4): 14-17.
- [26] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. 北京:中国电力出版社, 2001.
Kundur P. Power System Stability and Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [27] 徐光虎,苏寅生,等. 基于特征值分析法的 PSS最佳安装地点确定 [J]. 继电器, 2004, 32 (8): 1-4.
XU Guang-hu, SU Yin-sheng, et al Identification of PSS Optimum Location Based on Eigenvalue Analysis Method [J]. Relay, 2004, 32 (8): 1-4.
- [28] 牛振勇,杜正春,方万良,等. 基于进化策略的多机系统 PSS参数优化 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (2): 22-27.
NIU Zhen-yong, DU Zheng-chun, FANG Wan-liang, et al Parameter Optimization of Multi-machine Power System Stabilizers Using Evolutionary Strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (2): 22-27.
- [29] 彭飞金,陈金富,戴堂云. FACTS元件动态特性分析 [J]. 电力系统自动化, 2000, 20 (5): 11-14.
PENG Fei-jin, CHEN Jin-fu, DAI Tang-yun Dynamic Performance Analysis of FACTS Devices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 20 (5): 11-14.
- [30] 苏建设,柯宁,陈陈. 提高暂态稳定的励磁与 FACTS协调策略设计 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (9): 6-10.
SU Jian-she, KE Ning, CHEN Chen Coordinated Design of Generator Excitation and FACTS for Transient Stability Enhancement [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (9): 6-10.
- [31] Wu Q H, Hogg B W, Jwin G W. A Neural Network Regulator for Turbogenerators[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1992, 3 (1).
- [32] Zhang Y, Malik O P, Chen G P, et al An Artificial Network Based Adaptive Power System Stabilizer [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1993, 8 (1): 71-77.
- [33] Zhang Y, Malik O P, Chen G P. Artificial Neural Network Power System Stabilizers in Multimachine Power System Environment [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1995, 10 (1): 147-155.
- [34] CHENG Shi-jie, ZHOU Ru-jing, GUAN Lin An On-line Self-learning Power System Stabilizer Using a Neural Net-

- work Method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 926-931.
- [35] Hiyama T. Rule-based Stabilizer for Multi-machine Power System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(2): 403-411.
- [36] Hiyama T, Oniki S, Nagashima H. Evaluation of Advanced Fuzzy Logic PSS on Anabg Network Simulator and Actual Installation on Hydro Generators[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1996, 11(1): 125-131.
- [37] 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 HongKong: 1997. 77-82.
- [38] 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. 模糊电力系统稳定器[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(12): 1-3.
GAO Feng, QN Yi-hong. Synthetic Optimum Design of Fuzzy Controller Using Fuzzy Neural Network, Part : Fuzzy PSS[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(12): 1-3.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 马燕峰, 赵书强, 魏清. 基于遗传算法的交直流电力系统稳定器和附加控制器的协调[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(5): 75-78.
MA Yan-feng, ZHAO Shu-qiang, WEI Qing. Coordination of AC/DC PSS and Additional Controllers Based on GA Algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(5): 75-78.
- [42] 孙衢, 王永玉, 陈陈. 基于计算智能体的多个阻尼控制器协调设计[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(16): 6-9.
SUN Qu, WANG Yong-yu, CHEN Chen. Coordinated Design of Multiple Damping Controllers Based on Computational Intelligence[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(16): 6-9.

收稿日期: 2004-09-14; 修回日期: 2004-09-27

作者简介:

李强(1981-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统安全分析与稳定运行; E-mail: fw112@tom.com;

袁越(1966-),男,工学博士,教授,博士生导师,主要从事电力系统运行与控制等方面的研究与教学工作;

周海强(1971-),男,博士,讲师,主要从事电力系统分析与稳定控制等方面的研究与教学工作。

A brief review on the causes, analysis methods and restraining measures of low frequency oscillation in power system

LI Qiang, YUAN Yue, ZHOU Hai-qiang

(School of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: As the rapid development of power industry, the scale of the power system becomes larger and larger. Thus, it should be more reliable and economical. At the same time, the low frequency oscillation of large-scale inter-area system has badly endangered the secure operation of the system. This paper briefly presents the causes and analysis methods of low frequency oscillations in power system, and its restraining measures. The direction of future development is predicted.

Key words: low frequency oscillation; eigenvalue analysis; power system stabilizer(PSS)

(上接第 75 页 continued from page 75)

作者简介:

雷宏(1964-),男,长期从事电力生产和管理工作;

E-mail: 13972576219@163.net

罗红俊(1972-),男,长期从事继电保护工作。

Operation analysis of the line protection in Ge-Chen line of 220 kV Gezhouba switchyard

LEI Hong, LUO Hong-jun

(Gezhouba Hydroelectric Power Plant, Yichang 443002, China)

Abstract: Ge-Chen line was out-of-operation in 220 kV Gezhouba switchyard on August 24, 2003 for a short circuit of single-phase earth fault. This paper introduces the system condition and relay operation when the fault occurred. The maloperation of relay protection at both sides of Ge-Chen line is analysed in detail with a series of derivations and experiment.

Key words: line protection; Gezhouba; operation behavior; analysis