

# 间谐波引起电力系统次同步振荡

## ——工程实例、机理、作用形式及应对措施

金维刚<sup>1</sup>, 刘会金<sup>1</sup>, 李智敏<sup>2</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 三门峡供电公司, 河南 三门峡 472000)

**摘要:** 例举分析了两个由间谐波引起电力系统次同步振荡的工程实例。应用调制理论分析了两交流侧额定频率相同的异步 HVDC 系统产生间谐波的机理; 指出间谐波的频率如果与汽轮机转子轴系自然频率相匹配, 并且具有一定的幅值, 就可能激发次同步振荡, 这就是间谐波引起电力系统次同步振荡的机理。归纳了间谐波引起电力系统次同步振荡的两种作用形式, 第一种作用形式表现为剧烈的轴系扭振, 第二种则可以称为轴系的长期累积疲劳寿命损耗; 对两种作用形式的激发条件和特点进行了分析; 同时指出, 第二种作用形式普遍存在并且对汽轮机轴系的危害甚至比三相对地故障更严重。探讨了间谐波引起次同步振荡的应对措施。

**关键词:** 间谐波; 次同步振荡; 工程实例; 机理; 作用形式; 长期累积疲劳寿命损耗; 应对措施

### Interharmonic exciting subsynchronous oscillation in electric power systems ——engineering examples, mechanism, types of interaction and counter-measures

JIN Wei-gang<sup>1</sup>, LIU Hui-jin<sup>1</sup>, LI Zhi-min<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Sanmenxia Power Supply Company, Sanmenxia 472000, China)

**Abstract:** Firstly, two engineering examples concerning interharmonic exciting SSO are enumerated and analyzed. Then, the mechanism of interharmonics arising from asynchronous HVDC scheme linking two AC systems of same nominal frequency is analyzed based on modulation theory; SSO will be excited if the frequencies of interharmonics match with the nature frequencies of shafts and at the same time the magnitudes of them are noticeable, which is the mechanism of interharmonic exciting SSO. Next, two types of interaction with regard to interharmonic exciting SSO are generalized, one is the severe shaft torsional oscillation, and the other is the long-term fatigue life loss; the excitation conditions and characteristics of the two types of interaction are analyzed; in fact, the second type of interaction is ubiquitous and its harmfulness to shafts is even greater than three-phase-to-ground fault. Finally, the counter-measures against interharmonic exciting SSO are discussed.

**Key words:** interharmonic; subsynchronous oscillation(SSO); engineering examples; mechanism; types of interaction; long-term fatigue life loss; counter-measures

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)09-0031-06

## 0 引言

电力系统是一个由发电机组(含发电机控制设备,如励磁机、原动机、调速器等)、变压器、输配电系统和用电设备等很多单元组成的统一大系统<sup>[1]</sup>。电力系统的次同步振荡则是指汽轮发电机组在运行(平衡)点受到扰动后处于特殊运行状态下出现的一种异常状态,在这种运行状态下,电气系统与汽轮发电机组之间在一个或多个低于系统同步频率的频率下进行能量交换。按照 IEEE 工作组对次同步振荡的定义,次同步振荡过程不包括汽轮发电

机转子轴系的刚体振荡模态<sup>[2-3]</sup>。

各国学者对于电力系统次同步振荡问题进行了大量的研究,具体可归纳为以下几个方面,即次同步振荡产生的机理、次同步振荡的表现形式、次同步振荡的分析方法以及次同步振荡的预防和控制措施等。文献[3]综合了现有的国内外文献,从上述几个方面分析了电力系统的次同步振荡问题,但是,它并未提及有关间谐波引起电力系统次同步振荡的问题。文献[4]提出:“有关 HVDC 系统非特征谐波,以及异步联结的 HVDC 系统的谐波能否引起次同步振荡的问题,工程界并没有实例,也可以作为一个

学术方面的先期研究工作”。文献[5]则同样表示：“对于 HVDC 系统非特征谐波能否引起次同步振荡的问题，实用的分析手段缺乏，工程界还没有发现这方面的实例，但可以作为一个学术方面的研究工作”。而事实上，国外的相关文献曾经报道过间谐波引起次同步振荡的工程实例；也有一些文献对间谐波引起次同步振荡的机理及表现形式、甚至是预防和控制措施都进行过研究和探讨。

本文就是在对这些文献进行归纳总结的基础上，比较详细地分析和探讨了间谐波引起电力系统次同步振荡的相关问题。本文的主要内容可以概括为四个方面，第一方面是介绍了间谐波的概念和分类并且重点分析了两个由间谐波引起电力系统次同步振荡的工程实例。第二方面主要是用调制理论分析了两交流侧额定频率相同的异步 HVDC 系统产生间谐波的机理，并以此为出发点，详细探讨了间谐波激发次同步振荡的机理、条件及影响因素。第三方面则是归纳了间谐波激发次同步振荡的两种作用形式，一种是以剧烈的轴系扭振形式出现，另一种则可称为轴系的长期累积疲劳寿命损耗，对两种作用形式的激发条件、特点进行了分析并指出第二种作用形式对汽轮机轴系的危害甚至比三相对称故障更严重。第四方面就是针对间谐波引起次同步振荡的应对措施给出了相应的建议。

## 1 间谐波引起电力系统次同步振荡的工程实例

### 1.1 间谐波的定义

IEC61000-2-1 对间谐波的定义如下：间谐波的频率在各次谐波电压（电流）之间，不是基波频率的整数倍，表现为离散频率或宽带频谱。IEEE 间谐波任务组（IEEE Task Force on Interharmonics）采用了 IEC 对间谐波的定义。在不同的文献中<sup>[6]</sup>，间谐波有时又被称为非谐波、非特征谐波或者是分数谐波。有文献还特别地把频率低于工频基波频率的间谐波成分称作次谐波(subharmonics)，把频率高于工频基波频率的间谐波成分称作超谐波(superharmonics)。

### 1.2 间谐波引起电力系统次同步振荡的工程实例

文献[7]比较全面地介绍了电力系统中的大型钢铁厂设备，如轧钢机和电弧炉等对电力系统电能质量的影响以及对汽轮发电机等设备的危害：“电弧炉和轧钢机运行过程中产生的谐波、次谐波以及超谐波，可以引起敏感设备的工作故障、导致发热、甚至造成旋转设备的累积机械疲劳损坏”。

文献[7]的作者，即“Working Group J5 of the

Rotating Machinery Protection Subcommittee”（以下简称“工作组”）曾经仔细检查过一起由大型轧钢厂负荷引起的汽轮发电机损坏事故：受损的发电机容量为 350 MW，位于美国西部，该发电机通过一条 3 英里长、额定电压为 230 kV 的输电线向两台容量为 60 MVA 的电弧炉供电。需要特别指出的是，该钢厂安装有两台晶闸管控制的 SVC，用来维持系统电压稳定和抑制闪变。

事故发生后，工作组经过仔细的测试和分析发现，在系统的电流频谱中周期性地出现一个间谐波频率成分，而该间谐波电流信号的源头则可以追溯到附近钢厂的 SVC 装置的两个控制回路之中的一个。该控制回路在钢厂处于低功率工作环境时变得不稳定，控制回路极高的响应速率导致了对 60 Hz 基波的幅值调制。调制的结果是产生了间谐波频率成分，比较典型的是 55 Hz 和 65 Hz 的间谐波电流信号，65 Hz 的间谐波信号并未在 SVC 三角形接线的外部出现，在发电机端只监测到了 55 Hz 的间谐波信号。工作组分析后得出结论：55 Hz 间谐波成分在系统的三相电流中都出现了，并且随着钢厂工作状态的不同在 54~58 Hz 之间波动，由于该反相旋转的间谐波成分与发电机转子轴系的第 6 模态自然频率相合拍，所以就激发了转子的轴系扭振，转子轴系扭振应力水平在很短的时间内变得非常高，直接导致轴系损坏。

然而，激发轴系扭振的 55 Hz 间谐波电流信号的幅值却非常小，大约只占到发电机正序基波负载电流的 1%。

工作组在查明事故的真相后，重新整定了控制回路的响应速率，这样就破坏了轴系扭振的激发条件，发电机的轴系扭转应力水平也恢复到安全值。

以上所述的这个工程实例，就是间谐波引起电力系统次同步振荡的典型例子。所以，工作组在文献[7]中呼吁：“必须特别注意交—交变频装置和电弧炉等设备在工作中产生的间谐波，这些间谐波能够激发汽轮发电机的轴系扭振，所产生的轴系应力水平甚至会超过轴系的高周疲劳限值。相比之下，谐波却并未受到特别关注，这是因为，一般在设计机械设备的时候，都会考虑到要避免在相应的谐波频率点附近发生机械谐振”。

除了文献[7]所述的例子外，文献[8]也报道了这样一个工程实例：一个功率只有 0.35 MW 的间谐波成分，激发轴系扭振而产生的疲劳寿命损耗，使一台容量为 775 MVA 的汽轮发电机的轴系濒临毁坏。

这个工程实例也被文献[9-11]引用作为间谐波引起电力系统次同步振荡的分析实例。

## 2 间谐波引起电力系统次同步振荡的机理

间谐波大多出现在两交流侧频率不同的 AC-DC-AC 系统中<sup>[9]</sup>。事实上, AC-DC-AC 系统的间谐波产生机理与电力系统中广泛应用的很多系统与装置, 如 HVDC 系统及大型交-直-交变速驱动装置等产生间谐波的机理一样。同时考虑到我国的实际情况, 例如我国西北电网和华中电网经过灵宝背靠背直流工程联网后, 就是两个 50 Hz 交流系统通过直流异步联网。因此, 从代表性和实用性角度出发, 本文主要以两个额定频率相同的交流电网通过直流环节互联的异步 HVDC 系统为例, 分析其间谐波产生的机理并探讨间谐波引发次同步振荡的机理。如图 1 所示。

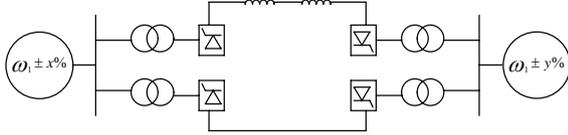


图 1 两交流侧额定频率相同的异步 HVDC 系统

Fig.1 Asynchronous HVDC with linking systems of same nominal frequency

首先采用调制理论分析 HVDC 系统的间谐波产生机理。根据调制理论, 变流器的交流输出电流  $i_{ac}(t)$ , 可以表示为开关函数  $s(t)$  与调制函数  $i(t)$  的乘积。如图 2 所示。

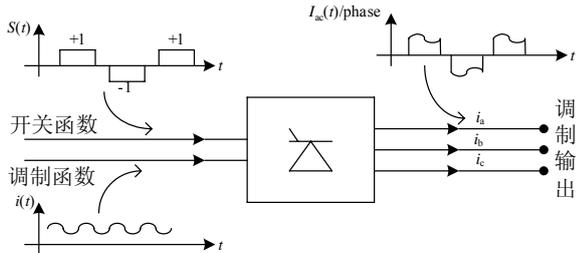


图 2 调制原理示意图

Fig.2 Switching function and modulating function

对于实际运行的 HVDC 系统, 直流电流中一般含有纹波, 交流电流是对直流电流进行采样而得到的; 因而, 交流电流也不会是平滑的, 同样含有纹波。因此, 调制函数  $i(t)$  可以表示成直流电流和正弦纹波的叠加:

$$i(t) = I_d + \sum_{z=1}^{\infty} a_z \sin(\omega_z t + \phi_z) \quad (1)$$

在式(1)中:  $a_z$ 、 $\omega_z$ 、 $\phi_z$  分别为正弦纹波分量的幅

值、角频率和初相角;  $\omega_z$  可以为任意值, 而不一定是基波角频率的整数倍。

而开关函数  $s(t)$  则可以分解成傅立叶级数:

$$s(t) = k[\cos(\omega_1 t) - \frac{1}{5}\cos(5\omega_1 t) + \frac{1}{7}\cos(7\omega_1 t) - \frac{1}{11}\cos(11\omega_1 t) + \frac{1}{13}\cos(13\omega_1 t) - \frac{1}{17}\cos(17\omega_1 t) + \dots] \quad (2)$$

式(2)中:  $k = \frac{2\sqrt{3}}{\pi}$ ;  $\omega_1$  是交流角频率。

当然, 有的文献<sup>[4]</sup>指出: 应该计及换流阀换相过程的影响, 对理想的电压、电流开关函数作修正, 即换相期间电压开关函数的幅值为 0.5, 换相结束时刻由 0.5 跃变为 1.0, 对于电流开关函数, 考虑到换相电抗的作用, 换相期间电流的变化过程不是阶跃, 而是渐进的, 所以其换相过程用渐进直线来近似表示。但是, 由于采用修正后的开关函数, 对间谐波的频率影响很小, 只影响其幅值, 因此, 定性分析时, 可采用理想开关函数<sup>[5,12]</sup>。本文采用理想开关函数定性分析 HVDC 系统产生间谐波的机理。

由调制理论, 变流器输出的交流电流, 可以表达为开关函数和调制函数的乘积:

$$\begin{aligned} i_{ac}(t) = i(t) \times s(t) &= [I_d + \sum_{z=1}^{\infty} a_z \sin(\omega_z t + \phi_z)] \times k [\cos(\omega_1 t) - \frac{1}{5}\cos(5\omega_1 t) + \frac{1}{7}\cos(7\omega_1 t) - \frac{1}{11}\cos(11\omega_1 t) + \frac{1}{13}\cos(13\omega_1 t) - \frac{1}{17}\cos(17\omega_1 t) + \dots] \\ &= k I_d \times [\cos(\omega_1 t) - \frac{1}{5}\cos(5\omega_1 t) + \frac{1}{7}\cos(7\omega_1 t) - \frac{1}{11}\cos(11\omega_1 t) + \frac{1}{13}\cos(13\omega_1 t) - \frac{1}{17}\cos(17\omega_1 t) + \dots] \\ &\quad + k [\sum_{z=1}^{\infty} a_z \sin(\omega_z t + \phi_z) \times \cos(\omega_1 t) - \frac{1}{5} \sum_{z=1}^{\infty} a_z \sin(\omega_z t + \phi_z) \times \cos(5\omega_1 t) + \frac{1}{7} \sum_{z=1}^{\infty} a_z \sin(\omega_z t + \phi_z) \times \cos(7\omega_1 t) - \frac{1}{11} \sum_{z=1}^{\infty} a_z \sin(\omega_z t + \phi_z) \times \cos(11\omega_1 t) + \frac{1}{13} \sum_{z=1}^{\infty} a_z \sin(\omega_z t + \phi_z) \times \cos(13\omega_1 t) - \frac{1}{17} \sum_{z=1}^{\infty} a_z \sin(\omega_z t + \phi_z) \times \cos(17\omega_1 t) + \dots] \end{aligned} \quad (3)$$

用三角公式  $\sin A \cos B = \frac{1}{2}[\sin(A+B) + \sin(A-B)]$  对式(3)进行化简, 则有:

$$\begin{aligned} i_{ac}(t) = k I_d \times [\text{特征频率成分}] &+ \sum_{z=1}^{\infty} \frac{k a_z}{2} [\sin(\omega_1 t + \omega_z t + \phi_z) - \sin(\omega_1 t - \omega_z t - \phi_z)] - \sum_{z=1}^{\infty} \frac{k a_z}{10} [\sin(5\omega_1 t + \omega_z t + \phi_z) - \sin(5\omega_1 t - \omega_z t - \phi_z)] + \sum_{z=1}^{\infty} \frac{k a_z}{14} [\sin(7\omega_1 t + \omega_z t + \phi_z) - \sin(7\omega_1 t - \omega_z t - \phi_z)] - \sum_{z=1}^{\infty} \frac{k a_z}{22} [\sin(11\omega_1 t + \omega_z t + \phi_z) - \sin(11\omega_1 t - \omega_z t - \phi_z)] + \dots \end{aligned} \quad (4)$$

在式(4)中, 若将  $\sum_{z=1}^{\infty} a_z \sin(\omega_z t + \phi_z)$  简记为  $a_z \sin(\omega_z t + \phi_z)$ , 则式(4)可以进一步简写为:

$$i_{ac}(t) = kI_d \times [\text{特征频率成分}] + \frac{ka_z}{2} [\sin(\omega t + \omega_z t + \phi_z) - \sin(\omega t - \omega_z t - \phi_z)] - \frac{ka_z}{10} [\sin(5\omega t + \omega_z t + \phi_z) - \sin(5\omega t - \omega_z t - \phi_z)] + \frac{ka_z}{14} [\sin(7\omega t + \omega_z t + \phi_z) - \sin(7\omega t - \omega_z t - \phi_z)] - \frac{ka_z}{22} [\sin(11\omega t + \omega_z t + \phi_z) - \sin(11\omega t - \omega_z t - \phi_z)] + \dots \quad (5)$$

式(5)中的各种频率组合就有可能出现小于  $\omega_1$  的次同步频率, 如果这样的频率与汽轮发电机轴系自然频率相匹配, 且具有一定的幅值, 那么就有可能激发次同步振荡。这就是间谐波引起电力系统次同步振荡的机理<sup>[12]</sup>。

考虑到在实际的 HVDC 系统中, 12 脉冲换流器使用的最为广泛<sup>[13]</sup>。对于 12 脉冲 HVDC 系统, 它的直流侧电流中含有逆变侧系统的 12 次、24 次、36 次等谐波成分; 因此, 以 12 脉冲换流器为例将式(5)展开, 可以得到:

$$i_{ac}(t) = [I_d + b \sin(12\omega_2 t + \phi_2) + c \sin(24\omega_2 t + \phi_2) + d \sin(36\omega_2 t + \phi_2) + \dots] \times k \times [\cos(\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) - \frac{1}{23} \cos(23\omega t) + \frac{1}{25} \cos(25\omega t) - \frac{1}{35} \cos(35\omega t) + \frac{1}{37} \cos(37\omega t) - \dots] = kI_d \times [\text{特征频率成分}] + \frac{ka_z}{2} [\sin(\omega t + 12\omega_2 t + \phi_2) - \sin(\omega t - 12\omega_2 t - \phi_2)] - \frac{ka_z}{22} [\sin(11\omega t + 12\omega_2 t + \phi_2) - \sin(11\omega t - 12\omega_2 t - \phi_2)] + \frac{ka_z}{26} [\sin(13\omega t + 12\omega_2 t + \phi_2) - \sin(13\omega t - 12\omega_2 t - \phi_2)] - \frac{ka_z}{46} [\sin(23\omega t + 24\omega_2 t + \phi_2) - \sin(23\omega t - 24\omega_2 t - \phi_2)] + \frac{ka_z}{50} [\sin(25\omega t + 24\omega_2 t + \phi_2) - \sin(25\omega t - 24\omega_2 t - \phi_2)] - \frac{ka_z}{70} [\sin(35\omega t + 36\omega_2 t + \phi_2) - \sin(35\omega t - 36\omega_2 t - \phi_2)] + \frac{ka_z}{74} [\sin(37\omega t + 36\omega_2 t + \phi_2) - \sin(37\omega t - 36\omega_2 t - \phi_2)] - \dots \quad (6)$$

在式(6)中,  $k = \frac{2\sqrt{3}}{\pi}$ ,  $b$ 、 $c$ 、 $d$  分别为 HVDC 系统直流侧所含的 12 次、24 次、36 次谐波电流的幅值。由式(6)可以看出, 交流系统中可能出现两种类型的频率成分: 第一种是形如  $11\omega_1 + 12\omega_2$ 、 $13\omega_1 + 12\omega_2$ 、 $23\omega_1 + 24\omega_2$ 、 $25\omega_1 + 24\omega_2$ 、 $35\omega_1 + 36\omega_2$ 、 $37\omega_1 + 36\omega_2$  等的频率成分, 可以称之为高频成分, 高频成分很容易由滤波器进行吸收; 另一种是形如  $11\omega_1 - 12\omega_2$ 、 $13\omega_1 - 12\omega_2$ 、 $23\omega_1 - 24\omega_2$ 、 $25\omega_1 - 24\omega_2$ 、 $35\omega_1 - 36\omega_2$ 、 $37\omega_1 - 36\omega_2$  等的频率成分, 不妨称之

为低频成分, 低频成分很可能处在次同步频率范围内, 并且其幅值递减很快<sup>[10]</sup>。文献[12]也指出: 如果两个 50 Hz 交流系统通过直流异步联网, 计及上述前 4 项次同步电流分量 ( $11\omega_1 - 12\omega_2$ 、 $13\omega_1 - 12\omega_2$ 、 $23\omega_1 - 24\omega_2$ 、 $25\omega_1 - 24\omega_2$ ), 通过大量统计计算, 可以发现当两个系统的运行频率相差大于 0.4 Hz 时, 两个系统的发电机轴上都有可能产生次同步转矩, 其频率为 10 Hz 和 24 Hz, 且随着两个系统的运行频率差递增。

文献[9]也表明, 对于一个异步互联的 HVDC 系统, 即使两端交流侧频率有极小的差别, 也有可能使产生的间谐波电流值达到 0.1% p.u., 这也就是说, 对一个传输功率为 2 000 MW 的 HVDC 系统来说, 其交流侧产生的间谐波功率可以达到 2 MW, 而前述的工程实例表明, 一个功率仅为 0.35 MW 的间谐波成分就足以使一个容量为 775 MVA 的大型汽轮发电机的轴系处于毁坏的边缘。

### 3 间谐波引起电力系统次同步振荡的两种作用形式

间谐波引起电力系统汽轮发电机的轴系扭振情况, 可以表现为两种作用形式。第一种作用形式就是间谐波的频率与轴系自然频率严格一致<sup>[9-10]</sup>, 并且间谐波具有一定的幅值, 这时候会激发非常剧烈的轴系扭振, 转子轴系的扭振应力水平在很短的时间内就会变得非常高, 直接导致轴系损坏。符合以上条件的汽轮发电机一般有两个特点, 第一, 由于轴系的质量块数目较多并且轴系的长度较长, 因而轴系的自然频率有多个, 并且大都处于 5~20 Hz 的频率范围内; 第二, 轴系的机械谐振因子  $Q$  值一般都非常高。至于间谐波的幅值应该达到多大才会激发剧烈的轴系扭振, 文献[14]表明, 式(6)中的频率成分  $11\omega_1 - 12\omega_2$  及  $13\omega_1 - 12\omega_2$  的幅值范围一般为 0.001~0.002 p.u.。实际上, 若间谐波的幅值达到 0.002 p.u., 就比较严重了。

第二种作用形式可以称为“轴系的长期累积疲劳寿命损耗”。在这种情况下, 间谐波的幅值并不大, 或者间谐波频率与轴系自然频率并不是严格一致, 激发产生的轴系扭转应力水平并不是特别高。但是, 这并不表明第二种作用形式不严重, 事实上, 由于第一种作用形式要求的激发条件比较苛刻, 因而发生的概率较低, 而第二种作用形式则是普遍存在的<sup>[18-21]</sup>。

文献[15]就直接指出: HVDC 系统所产生的间谐波, 可能间歇性地激发汽轮发电机与 HVDC 变流器之间产生 SSO, 这种现象与汽轮发电机系统的周期性启/停过程非常地相似, 长期持续下去, 所累积

的疲劳寿命损耗就有可能使轴系损坏。

传统的观点认为, 系统的三相对地故障对汽轮发电机轴系的冲击最严重, 而文献[15]通过仿真分析计算后指出, 在相同的设定条件下, 对地故障造成的汽轮机转子 LP1F-LP2R 轴系的疲劳寿命损耗率为 0.378%, 而累积 30 年的、由间谐波激发轴系扭转所产生的疲劳寿命损耗率则高于 0.378%, 这就意味着轴系甚至能够经得住三相对地故障带来的冲击, 但是可能不能抵抗由 HVDC 系统所产生的间谐波对轴系的长期刺激。因此, 在发电机轴系的设计阶段, 也应该把间谐波电流的影响纳入考虑范围之内。

#### 4 间谐波引起电力系统次同步振荡的应对措施

由以上讨论可以看出, 针对间谐波引起电力系统次同步振荡的问题, 应该采取有效的应对措施, 防患于未然, 特别是当发电机处于以下情况, 即位于换流站或 SVC 系统附近、换流站触发延迟角过大、HVDC 系统平波电抗器阻抗值较低、发电机轴系机械阻尼较低、轴系材料安全系数较低等, 在这些情况下, 采用相应的监测预警、保护和缓解措施, 更是非常必要。具体有以下建议:

(1) 开发并采用相应的间谐波在线监测设备, 针对处于上述几种情况下的汽轮发电机, 进行间谐波的实时监测和预警。

(2) 采用相应的继电保护措施, 主要包括扭振继电器和电枢电流 SSR 继电器两种<sup>[3]</sup>。扭振继电器的作用就是采用恰当的测量扭振的传感器, 实时检测发电机组轴系的扭振情况, 一旦检测到汽轮发电机组轴系的机械扭振应力过大, 就立即发出将该机组与电力系统解列的指令, 并动作于相应的断路器, 将发电机组与系统隔离, 防止扭转相互作用的进一步扩大。电枢电流 SSR 继电器的原理与扭振继电器类似, 它必须对发电机组电枢电流中的次同步频率分量非常敏感, 在对该电流进行实时检测的过程中, 一旦发现电枢电流中持续出现较严重的次同步振荡分量时, 立即将该发电机组与系统解列, 使其免受破坏。

(3) 采用具有更高安全系数的轴系材料。在设计发电机轴系抗力的时候, 不仅仅要考虑三相对地故障的冲击作用, 还要考虑间谐波电流激发轴系产生的扭转应力的长期累积效应。文献[15-17]详细地给出了三相对地故障和间谐波电流造成汽轮机轴系疲劳寿命损耗的计算方法和评估依据。根据计算结果, 如果间谐波对轴系的危害比三相对地故障更严重, 则应该以间谐波电流激发轴系产生的扭转应力的长期累积效应作为设计发电机轴系抗力的主要依

据。

(4) 开发可以消弱或限制间谐波幅值的设备。这就涉及到间谐波的治理措施。

(5) 可以通过对异步 HVDC 系统的直流系统的附加控制来减小频率差, 具体的方法是采用按频率调制直流功率的控制策略, 使两个系统之间的频率趋于相等, 来防止出现次谐波<sup>[12]</sup>。

(6) 对于 6 脉冲异步 HVDC 系统, 调制产物中间谐波的频谱会更加丰富, 幅值也会更高, 这说明 6 脉冲系统的危害性会更大, 不过由于电力系统广泛采用 12 脉冲 HVDC 系统, 因此, 这一点并不需要特别关注。

(7) 对于 12 脉冲 HVDC 系统, 由式(6)可以看出,  $11\omega_1 - 12\omega_2$  和  $13\omega_1 - 12\omega_2$  两种次同步频率分量的幅值主要取决于直流侧所含的 12 次谐波电流的幅值。而文献[15]表明, 直流侧 12 次谐波的幅值可以通过调整 HVDC 系统的触发延迟角进行控制, 减小 12 次谐波的幅值, 就可以降低次谐波的含量, 从而可以减轻次谐波对发电机轴系的危害。

#### 5 结论

次同步振荡问题可以说是间谐波对电力系统最重要的危害之一。有一些观点认为, 间谐波激发次同步振荡的可能性较小, 甚至不会发生, 由前面的分析可以知道, 这只能说明间谐波引起次同步振荡的第一种作用形式, 即“剧烈的轴系扭振”, 发生的概率较低, 因为它的激发条件较为苛刻。而间谐波激发次同步振荡的第二种作用形式, 即“轴系的长期累积疲劳寿命损耗”则是普遍存在的, 并且其对发电机轴系的危害性甚至要高于三相对地故障对轴系的危害。学术界对第二种作用形式的研究较少, 因此不为人们所熟知, 但是它对轴系产生的“铁杵磨针”式的损耗不容小觑。

目前, 对于间谐波引起次同步振荡的相关问题的研究比较分散, 研究往往集中于某一方面, 较少从工程实例、机理、作用形式和危害性以及应对措施等方面对该问题进行详细的归纳总结及分析。本文主要围绕以上问题展开研究。希望本文所做的工作一方面能够加深和拓宽人们对于间谐波引起电力系统次同步振荡问题的了解; 另一方面能够为实际工程问题提供有利的借鉴和指导。

#### 参考文献

- [1] 杨卫东, 徐政, 韩祯祥. 电力系统灾变防治系统研究的现状与目标[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(1): 7-12. YANG Wei-dong, XU Zheng, HAN Zhen-xiang. Review and Objective of Research on Power System Collapse Prevention[J]. Automation of Electric Power Systems,

- 2000, 24(1): 7-12.
- [2] 文劲宇, 孙海顺, 程时杰. 电力系统的次同步振荡问题[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 1-4.  
WEN Jin-yu, SUN Hai-shun, CHENG Shi-jie. Sub-synchronous Oscillation in Electric Power Systems[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 1-4.
- [3] 程时杰, 曹一家, 江全元. 电力系统次同步振荡的理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [4] 周长春. 高压直流输电系统次同步振荡阻尼特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.  
ZHOU Chang-chun. Research on the SSO Damping Characteristics of HVDC Systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [5] 伍凌云. 复杂交直流输电系统次同步振荡的分析与控制[D]. 成都: 四川大学, 2007.  
WU Ling-yun. Analysis and Control of Sub-synchronous Oscillation of Complex HVDC/AC Power System[D]. Chengdu: Sichuan University, 2007.
- [6] 程浩忠. 电能质量概论[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [7] Solanics P, Kozminski K, Bajpai M, et al. The Impact of Large Steel Mill Loads on Power Generating Units[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 24-30.
- [8] Fick H. Excitation of Sub-synchronous Torsional Oscillations in Turbine-generator Sets by a Current-source Converter[J]. Siemens Power Engineering, 1982, 4(2): 83-86.
- [9] Yacamini R. Power System Harmonics, IV: Interharmonics[J]. Power Engineering Journal, 1996, 10(4): 185-193.
- [10] Yacamini R. How HVDC Schemes Can Excite Torsional Oscillations in Turbo-alternator Shafts[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 1986, 133(6): 301-307.
- [11] Lambrecht D, Kulig T. Torsional Performance of Turbine Generator Shafts Especially Under Resonant Excitation[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(10): 3689-3702.
- [12] 周群, 张益, 黄家裕. 非特征谐波引起的次同步振荡研究[J]. 电网技术, 1999, 23(12): 4-5.  
ZHOU Qun, ZHANG Yi, HUANG Jia-yu. Subsynchronous Oscillation Analysis in HVDC System—SSO Caused by Non-characteristic Harmonics[J]. Power System Technology, 1999, 23(12): 4-5.
- [13] Hu L, Yacamini R. Calculation of Harmonics and Interharmonics in HVDC Schemes with Low DC Side Impedance[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 1993, 140(6): 469-476.
- [14] Hammons T J, Bremner J J. Analysis of Variable-frequency Currents Superimposed on DC Currents in Asynchronous HVDC Links in Stressing Turbine-generator-exciter Shafts[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 1995, 10(1): 95-104.
- [15] Tsai J I, Lin Chi-Hshung, Tsao Ta-Peng. Assessment of Long-term Life Expenditure for Steam Turbine Shafts Due to Noncharacteristic Subharmonic Currents in Asynchronous Links[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 507-516.
- [16] Tsao T P, Lin C H. Long Term Effect of Power System Unbalance on the Corrosion Fatigue Life Expenditure of Low Pressure Turbine Blades[J]. IEE Proceedings of Science, Measurement and Technology, 2000, 147(5): 229-236.
- [17] Chyn C, Wu R C, Tsao T P. Torsional Fatigue of Turbine-generator Shafts Owing to Network Faults[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(5): 479-486.
- [18] Hu L, Yacamini R. Harmonic Transfer Through Converters and HVDC Links[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1992, 7(3): 514-525.
- [19] Prabhu N, Padiyar K R. Investigation of Subsynchronous Resonance with Vsc-based HVDC Transmission Systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 433-440.
- [20] Hammons T J. Electrical Damping and Its Effect on Accumulate Fatigue Life Expenditure of Turbine-generator Shafts Following Worst-case Supply System Disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, 101(6): 1552-1565.
- [21] Hammons T J, Bremner J J. Stressing of Turbine-generator-exciter Shafts by Variable-frequency Currents Superimposed on DC Currents in Asynchronous HVDC Links and Following Disturbances at Converter Stations[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 1994, 9(3): 503-513.

收稿日期: 2009-12-02; 修回日期: 2010-03-06

作者简介:

金维刚(1983-), 男, 博士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制; E-mail: jin101899@163.com

刘会金(1952-), 男, 教授, 博导, 研究方向为电能质量分析与控制;

李智敏(1966-), 男, 高级工程师, 长期从事电力生产技术监督和技术管理工作。