

宁东直流近区新能源诱发次同步振荡风险评估

任 勇, 黄永宁, 高 峰

(国网宁夏电力公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750011)

摘 要: 由于配套大容量的火电机组和装机容量较大的新能源发电并网机组, 宁夏电网宁东直流近区存在诱发次同步振荡风险问题, 本文分析和研究了宁夏电网宁东直流近区相关站点的 PMU 监测数据, 对宁东直流近区因新能源发电诱发火电机组次同步振荡风险评估。结果表明: 虽然间谐波引起次同步振荡的第一种作用形式, 在新能源发电较小出力工况下, 宁东直流近区火电机组发生次同步振荡的风险较低; 但是, 间谐波激发次同步振荡的第二种作用形式普遍存在, 其对发电机轴系的危害甚至高于三相对地故障, 因此, 需进一步加强各种工况下次同步谐波与振荡的监测、研究及防范工作, 以保障电网安全可靠运行。

关键词: 电力系统稳定; 次同步振荡; PMU 数据; 风险评估

中图分类号: TM714 **文献标志码:** B **文章编号:** 1672-3643(2016)01-0053-06

有效访问地址: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2016.01.012>

Risk assessment on new energy induced sub-synchronous oscillation in eastern Ningxia DC nearby area of Ningxia power grid

REN Yong, HUANG Yongning, GAO Feng

(Power Research Institute of State Grid Ningxia Power Co., Yinchuan Ningxia 750011, China)

Abstract: Because of matching large capacity coal-fired units, and larger installed capacity of new energy generating units in eastern Ningxia DC nearby area of Ningxia power grid, it exists the risk of inducing sub-synchronous oscillation. by analyzing and studing the PMU (phasor measurement unit) monitoring data from related substations of eastern Ningxia DC nearby area, conducts risk assessment for new energy generation inducing sub-synchronous oscillation of coal-fired units in eastern Ningxia DC nearby area of Ningxia power grid. The result shows that: even though under the condition of less output of new energy generation and the first efficient form of interharmonics caused sub-synchronous oscillation, appearing the risk of sub-synchronous oscillation is lower at coal-fired units in eastern Ningxia DC nearby area of Ningxia power grid, but the second efficient form of interharmonics caused sub-synchronous oscillation is common existence, the perniciousness for shafting of generator is even higher than the three-phase ground fault, so should further strengthen the monitoring, study and precaution for sub-synchronous harmonic and oscillation under various operating conditions, ensure power grid safe and reliable operation.

Key words: stability of power system; sub-synchronous oscillation; PMU data; risk assessment

DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2016.01.012

随着大气污染防治工作的稳步推进,风电、光伏等新能源发电大规模投产,并入较为薄弱电网,并通过特高压直流远距离送出,已成为我国今后电网发展的趋势^[1]。在国家和自治区相关政策的激励下,新能源发电在宁夏得到了快速发展。截止2015年10月底,宁夏电网新能源发电并网装机容量达8.73 GW,占全网总装机的30.4%,其中风电606 GW,光伏267 GW。风电发电量78 TW·h,光伏发电量3.3 TW·h,新能源发电量占总发电量的12%。

然而,新能源发电的快速发展和大规模的并网,也对电网的安全稳定运行提出了新的挑战^[2-4]。2015年7月1日某火电厂2号、1号、3号机组轴系扭振保护(torsional stress relay, TSR)相继动作跳闸,损失功率达1.28 GW。特高压直流配套火电厂3台机组因轴系TSR动作相继跳闸,对电网安全稳定造成一定影响,引发了对风电、光伏、火电及直流并存方式下电网安全稳定运行的担忧。前期分析表明,次同步谐波的产生、放大与传播可能与网架结构、风电出力、SVG/SVC、直流与火电机组运行方式等诸多因素相关。而且通过特高压直流外送的大规模风、光、火电打捆送端电网出现的次同步振荡现象尚无工程实践经验,属于全新事物,缺乏理论支撑,需要对其特性进行深入研究。

考虑到次同步谐波与振荡问题会在今后较长一段时间内持续威胁电网安全运行。本文通过对宁东直流近区内的主要场站PMU监测数据进行频谱分析,辨识出可能存在的次同步谐波频率分量与幅值,对宁东直流近区因新能源发电诱发火电机组次同步振荡风险进行评估,同时为摸清覆盖风、光、火电源结构地区次同步振荡情况及机理、基础性研究积累必要的基础数据与技术。

1 间谐波引起电力系统次同步振荡

1.1 间谐波引起电力系统次同步振荡的基本理论

1.1.1 间谐波的定义

IEC 61000-2-1对间谐波的定义如下:间谐波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^[5],间谐波有时又被称为非谐波、非特征谐波或者是分数波。特别地把频率低于工频基波频率的谐波成分称作次谐波(sub-harmonics),把频率高于频基波频率的间谐波成分称作超谐波(super-harmonics)。

1.1.2 次同步振荡基本概念

根据IEEE工作组的定义,次同步振荡(sub-synchronous oscillation, SSO)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,在这种状态下,电气系统与汽轮发电机组之间在1个或多个低于系统同步频率的频率下进行显著的能量交换。次同步谐振(sub-Synchronous resonance, SSR)是指由于汽轮发电机组与具有串联补偿电容的输电系统间的耦合作用而产生的机电振荡行为。

1.1.3 间谐波引起电力系统次同步振荡的机理与作用形式

文献[6-10]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。

间谐波引起电力系统汽轮发电机组的轴系扭振情况,可以归纳为2种作用形式,第一种作用形式表现为剧烈的轴系扭振。依据次同步振荡理论^[11-12],当交流电网存在频率为 f (例如20 Hz)的谐波时,火电机组定子绕组流过次同步谐波电流,将在机组轴系感应出互补频率为 $50-f$ (30 Hz)的交变力矩。只有当次同步谐波持续存在且频率接近机组轴系的谐振频率,电网中的次同步谐波分量才会引发机组轴系的次同步扭振。第二种则可以称为轴系的长期累积疲劳寿命损耗。文献[13-17]对2种作用形式的激发条件和特点进行分析后指出,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称故障更严重。

1.1.4 次同步振荡监测方法

现代电力系统的安全问题已经受到愈来愈多的关注,SSR是威胁电力系统安全的重要故障之一,它极易造成汽轮发电机组的轴系严重破坏^[18],

因此,如何对 SSR 进行有效准确的检测显得尤其重要。现有的 SSR 监测方法按测量信号的不同分为机械量测量和电气量测量两种。基于机械量测量的 SSR 监测装置通常是通过在发电机轴系两端装设齿轮片的方法实现。这种方法的原理是利用电磁感应原理快速测量轴系的瞬时速度和轴系的机械位移偏差,从而判断是否发生了 SSR^[6]。基于电气量测量的 SSR 监测可以只测量三相瞬时电流值。测量信号经过滤波处理,得到其中的次同步频段信号,将它和整定值比较,就可以做出逻辑判断,经延时电路以决定是否应该做出报警或者动作于保护。这种基于电气量的监测方法结构简单,价格便宜,可靠性高,便于维护^[19]。

本文选取瞬时电流作为测量信号, 辨识出可能存在的次同步频率分量与幅值, 对可能存在的风险做出评估。

1.2 宁东直流近区 SSO 监测原则及监测点的选取

1.2.1 宁东直流近区结构与特点

图 1 所示为宁夏电网宁东直流近区系统结构。由图 1 可以看出,宁东直流近区有配套大容量的火电机组,且近区并网新能源发电装机容量较大,不同电压等级接入电网后,机组附近的串补、直流控制器或者柔性输电设备能够引起火电机组轴系扭振。而大量电力电子设备密集接入后对电

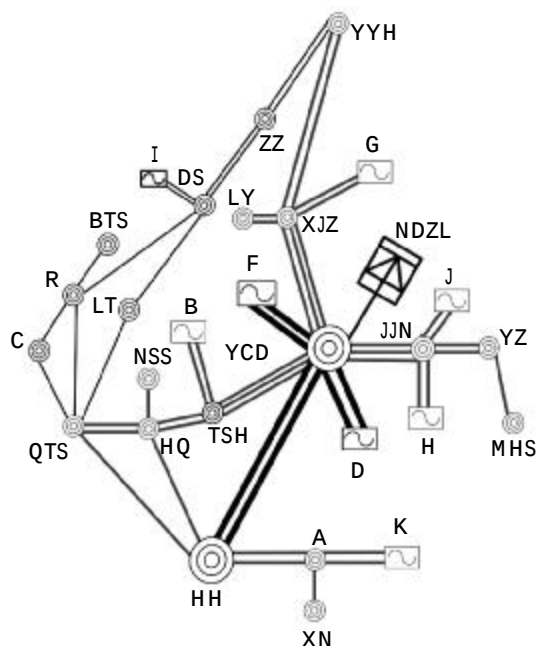


图 1 宁夏电网宁东直流近区系统结构

网特性变化,以及变频设备的涉网特性的影响,在理论与实践中都存在盲区。为此,拟定选取宁东直流近区新能源集中接入站及火电机组作为 SSO 分析的切入点,对宁东直流近区的 SSO 风险进行评估分析。

1.2.2 次同步振荡监测原则

某火电厂 SSO 事件初步分析表明,次同步谐波的产生、放大与传播可能与网架结构、风电出力、SVG/SVC、直流与火电机组运行方式诸多因素有关。结合此次事件的特征,考虑将具有以下特征的区域作为次同步谐波与振荡监测区域:

(1)选取网架结构较薄弱,短路容量较小的新能源发电汇集站。

(2)选取同时包含直流、新能源发电和火电的区域或者同时包含火电和新能源发电的区域。

(3)选取包含多种电力电子设备的区域,如磁控式可控高抗、SVC、SVG。

1.2.3 宁东直流近区 SSO 分析监测点的选取

在对宁东直流近区次同步振荡风险评估时,考虑在上述直流近区选取涉及变电站、近区火电厂、新能源发电汇集站等,包括 330 kV 变电站 A、220 kV 集中站 B、C 以及 D、E、F 火电厂作为监测点。

2 宁东直流近区 SSO 风险评估

2.1 分析数据筛选

获取宁东直流近区监测点相关厂站的 PMU 数据,对 PMU 动态录波数据中各监测点的 A 相电流进行频谱分析,重点分析 5~45 Hz 范围内谐波频率分量及其幅值。在获取 PMU 数据的时段,所对应宁夏电网各风电场的出力约为其装机容量的 10%~30%,同时该地区的直流送电在 4 000 MW 左右。

2.2 分析结果

2.2.1 330 kV 变电站 A

变电站 A 监测到的 330 kV 线路的基波幅值为 379.59 A, 对该监测点的数据分析结果如图 2、表 1 所示。由图 2 可知, 所监测线路存在较为明显

的间谐波分量,330 kV 线路在频率 5.914 Hz、7.117 Hz、9.021 Hz 和 10.35 Hz 附近的次同步谐波分量突出,且由表 1 可以看出,频率为 10.35 Hz 的间谐波所占基波含量较大,约为 0.019%。

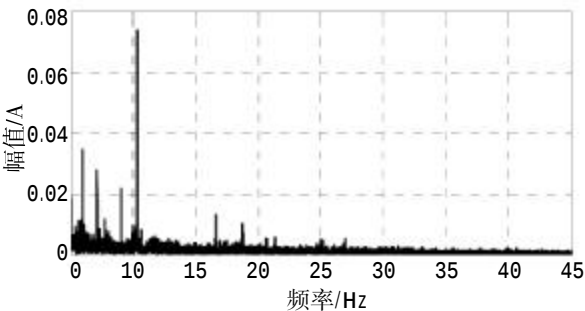


图 2 变电站 A 330 kV 线路次同步谐波频谱

表 1 变电站 A 330 kV 线路次同步谐波数据

频率/Hz	幅值/A	含量/%
5.914	0.034	0.009
7.117	0.027	0.007
9.021	0.021	0.005
10.35	0.073	0.019

2.2.2 220 kV 变电站 B

变电站 B 所监测的 220 kV 线路的基波幅值为 13.305 A。分析图 3 可知,该变电站的 220 kV 线路在频率 7.489 Hz 附近的次同步谐波分量突出,但所占基波含量较小。分析结果如表 2 所示。

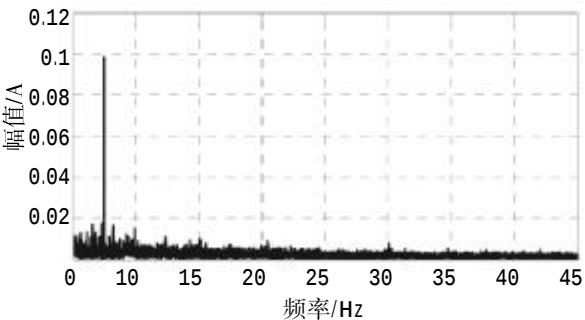


图 3 变电站 B 220 kV 线路次同步谐波频谱

表 2 变电站 B 220 kV 线路次同步谐波数据

频率/Hz	幅值/A	含量/%
7.489	0.098 06	0.093

2.2.3 220 kV 变电站 C

变电站 C 所监测的 220 kV 线路的基波幅值为 116.921 A。对图 4 分析表明,该新能源发电汇集站的 220 kV 出线含有较为明显的次同步谐波分量。由表 3 可以看出,该监测点频率值为 7.489 Hz

的间谐波含量较为突出,对应的幅值为 0.204 A,所占基波含量约 0.17%。

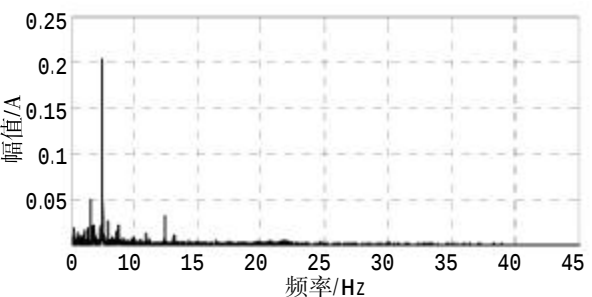


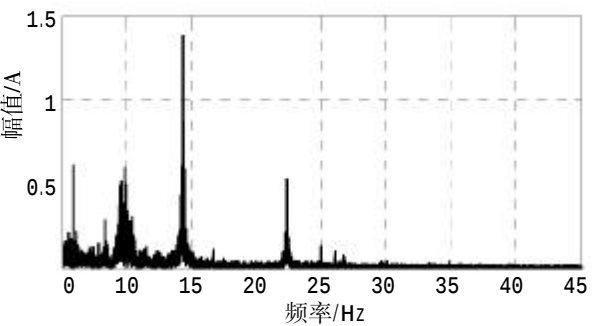
图 4 变电站 C 220 kV 线路次同步谐波频谱

表 3 变电站 C 220 kV 线路次同步谐波数据

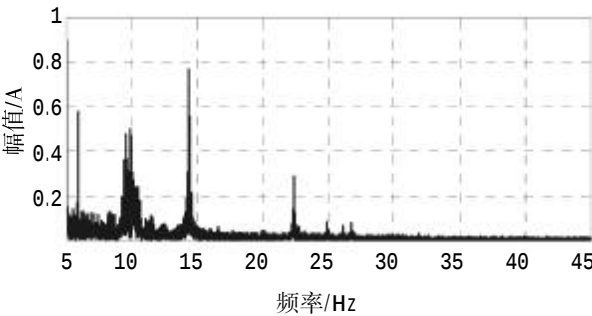
频率/Hz	幅值/A	含量/%
6.61	0.050	0.042
7.489	0.204	0.174
12.42	0.032 3	0.027

2.2.4 D 电厂

图 5、表 4、表 5 所示为 D 电厂的频谱分析结果,其中 1 号机组对应的基波幅值为 18 210.1A,2 号机组对应的基波幅值为 9 857.63 A。图 5 与表 4、表 5 分别表明,D 电厂的 1 号、2 号发电机组机端在频率 5.914 Hz、9.875 Hz、14.35 Hz 及 20.36 Hz 附近的次同步谐波分量突出,而且该监测点 14.35 Hz 间谐波所对应幅值相对较高,其值为 1.375 A。



(a) 1 号机组



(b) 2 号机组

图 5 D 电厂 1 号、2 号机组机端次同步谐波频谱

表 4 D 电厂 1 号、2 号机组机端次同步谐波数据

频率/Hz	幅值/A	含量/%
5.914	0.608	0.003
9.875	0.592	0.003
14.35	1.375	0.008
22.36	0.523	0.003

表 5 D 电厂 2 号机组机端次同步谐波数据

频率/Hz	幅值/A	含量/%
5.914	0.576	0.006
9.595	0.473	0.005
14.37	0.767	0.008
22.38	0.287	0.003

2.2.5 E 电厂

E 电厂的 1 号机组所对应基波幅值为 10 227.16 A。图 6、表 6 表明该监测点的数据中存在次同步谐波分量。由图 6 可以看出,所监测 E 电厂的 1 号发电机组机端频率 5.914 Hz、13.2 Hz 和 22.71 Hz 附近的次同步谐波分量突出,表 6 给出了所含谐波分量对应的幅值及所占基波含量的大小。

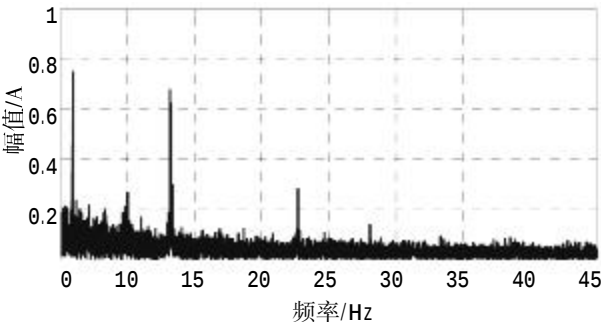


图 6 E 电厂 1 号机组机端次同步谐波频谱

表 6 E 电厂 1 号机组机端次同步谐波数据

频率/Hz	幅值/A	含量/%
5.914	0.749 1	0.007
13.2	0.678	0.007
22.71	0.278	0.003

2.2.6 F 电厂

图 7、表 7 所示为 F 电厂的分析结果。该电厂所监测 3 号机组的基波幅值为 21 276.7 A。图 7、表 7 表明,该电厂的 3 号发电机组机端频率 5.914 Hz、13.45 Hz、14.14 Hz 和 20 Hz 附近的次同步谐波分量较为明显,其中 13.45 Hz 的谐波分量所对应的幅值为 1.535 A,但考虑到基波电流幅值较大,故其所占基波含量较小。

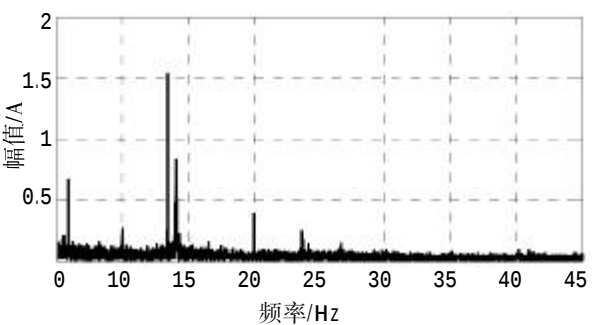


图 7 F 电厂 3 号机组机端次同步谐波频谱

表 7 F 电厂 3 号机组机端次同步谐波数据

频率/Hz	幅值/A	含量/%
5.914	0.661	0.003
13.45	1.535	0.007
14.14	0.838	0.004
20	0.388	0.002

通过对各监测点的数据分析表明,宁东直流近区部分监测点存在次同步谐波分量。宁东直流近区的部分火电厂机端存在次同步谐波分量,有次同步振荡发生的风险;在大多新能源集中接入的变电站出线电流分析中发现有次同步谐波分量,但幅值和基波占比均较小。

3 风险评估

(1)在新能源发电汇集站中,变电站 A 的 330 kV 出线在频率 10.35 Hz 附近含有较为明显的次同步谐波分量,占基波含量约 0.02%。变电站 C 的 220 kV 出线谐波分量主要在频率 7.489 Hz 附近,间谐波幅值为 0.204 A,约占基波含量的 0.17%。新能源发电汇集站含有次同步谐波分量,但幅值与占比较小,诱发 SSO 的风险小。

(2)在火电厂中,D 电厂的 1 号火电机组机端频率 14.35 Hz 附近间谐波对应幅值较高,F 电厂的 3 号发电机组机端在频率 13.45 Hz 附近的次同步谐波分量较为明显,但相对于基波的含量较低,不排除电厂自身的电气量泄漏的可能。当次同步谐波持续存在且相对基波的含量较高,频率接近机组轴系的谐振频率时,会引发机组轴系的次同步扭振风险。

(3)在风电小发工况下,宁东直流近区监测点次同步分量占比较低,近区火电机组发生次同步扭振的风险较低。

(4)此次分析时获取的监测数据仅限于个别时段,且新能源出力较小,因此,后续工作可考虑扩大数据监测时段,扩展监测工况,增加在各种典型运行工况下的次同步监测工作。

4 结论

(1)本文通过对宁东直流近区相关站点的PMU监测数据进行频谱分析,对宁东直流近区因新能源发电诱发火电机组次同步振荡风险进行评估,同时为摸清覆盖风光火电源结构地区次同步振荡情况及机理、基础性研究积累了必要的基础数据与技术。

(2)此次分析在宁夏电网的多个监测点中均发现次同步频率分量,建议进一步加强对次同步谐波与振荡问题的监测、研究及防范工作,为保障电网安全可靠运行提供依据。

(3)间谐波引起次同步振荡的作用形式有“剧烈的轴系扭振”与“轴系的长期累积疲劳寿命损耗”2种,前者激发条件较为苛刻,发生的概率较低;后者则是普遍存在的,并且其对发电机轴系的危害性不容小觑。本文从工程实例、作用形式以及危害性等方面对该问题进行了分析,以期能够加深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一定的参考。

参考文献:

- [1] 刘振亚,张启平,董存,等.通过特高压直流实现大型能源基地风/光/火电力大规模高效率安全外送研究[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2513-2522.
- [2] 肖湘宁,郭春林,高本锋,等.电力系统次同步振荡及其抑制方法[M].北京:机械工业出版社,2014:20-31.
- [3] 倪以信,陈寿孙,张宝霖.动态电力系统的理论与分析[M].北京:清华大学出版社,2002:105-116.
- [4] 毕天姝,孔永乐,肖仕武,等.大规模风电外送中的次同步振荡问题[J].电力科学与技术学报,2012,27(1):10-15.
- [5] 程浩忠.电能质量概论[M].北京:中国电力出版社,2008.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 金维刚,刘汇金,李志敏.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[J].电力系统保护与控制,2010,38(9):31-36.
- [11] Yacimini R.Power System Harmonics,IV: Interharmonics[J].Power Engineering Journal,1996,10(4):185-193.
- [12] Yacimini R.How HVDC Schemes Can Excite Torsional Oscillations in Turbo-alternator Shafts[J].IEEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution,1986,133(6):301-307.
- [13] Hu L,Yacimini R.Harmonic Transfer Through Converters and HVDC Links[J].IEEE Transactions on Power Electronics,1992,7(3):514-525.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Ysai J I,Lin Chi-Hsiung,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.
- [18] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Countermeasures to Subsynchronous resonance problems[J].IEEE Trans on Power Apparatus and systems,1980,99(5):1810-1818.
- [19] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Reader's guide to Subsynchronous resonance[J].IEEE Trans on Power Systems,1992,7(1):150-157.