次同步振荡引起的发电机组轴系疲劳损伤

刘 超¹,蒋东翔¹,谢小荣²,洪良友¹

(1. 电力系统国家重点实验室,清华大学热能工程系,北京市 100084;

2. 清华大学电机系,北京市 100084)

摘要:为提高电网输送能力而被广泛采用的各种电力电子装置可能会带来电网次同步振荡风险。 文中针对电网可能发生的次同步振荡现象,分析 600 MW 汽轮发电机组轴系结构,通过机网耦合 计算分析次同步振荡引起的机组轴系扭振,采用应力分析和疲劳寿命计算分析次同步振荡对机组 轴系的疲劳损伤。研究了不同参数所引起的轴系扭振特点,重点比较次同步振荡幅值和频率对轴 系疲劳损伤的影响。分析和研究结果将有助于提高机组寿命管理水平,有效评估电网波动容许值。 关键词:次同步振荡;汽轮发电机组;扭振;疲劳损伤

0 引言

近年来西电东送工程的实施和大型煤电基地的 建设使得装机容量快速提高,而输电线路的建设受 到多方面因素制约,出现了现有输电线路无法满足 新建机组电力送出的问题。采用串并联补偿、紧凑 型线路、动态无功补偿等技术的电子设备以及高压 直流输电等技术的发展为电网在现有条件下提高电 网输送能力提供了新的方法^[1-2],同时也给电网的稳 定运行带来了一定风险,设计和运行操作不当可能 引发电力系统的次同步振荡问题^[3-5]。

电网次同步振荡频率与发电机组扭振固有频率 满足特定互补关系时可引起发电机组轴系扭振迅速 增大甚至机组轴系损坏事故。美国在 20 世纪 70 年 代就接连发生过汽轮发电机组损坏的事故^[6]。近年 来由于次同步振荡引发轴系扭振而造成机组轴系损 坏的事故时有发生^[7-8],各国学者针对电网次同步振 荡引起轴系损伤的研究开展了很多工作^[9-10]。

本文在已有工作基础上结合国内实际,研究了 600 MW 汽轮发电机组的轴系扭振及次同步振荡引 起的疲劳损伤问题,研究中采用机网耦合分析软件 PSCAD/EMTDC 开展次同步振荡仿真研究,通过 有限元方法分析机组轴系扭振和局部应力,采用雨 流计数法和线性累积准则进行疲劳计算。通过大量 计算研究了不同参数所引起的轴系扭振特点,着重 分析了次同步振荡幅值与频率对轴系疲劳的影响, 分析与研究将有助于提高发电机组运行管理水平, 提高机组运行安全可靠性,有效评估次同步振荡报 警值,保障发电系统稳定运行等。

1 次同步振荡引起的机组轴系扭振分析

按照 IEEE 的次同步谐振特别工作组 (SSRWG)的定义^[11],次同步振荡包含了电网与发 电机组在1个或多个自然频率下(频率在同步频率 以下)交换能量的情况。次同步振荡引起的发电机 组轴系扭振的典型特征是机网耦合振荡,研究中仿 真了国内某电网中 600 MW 汽轮发电机组与输电 线路耦合振荡情况。机网耦合计算基于多质量块模 型,如图1所示。

高中压缸 低压缸 1 低压缸 2 发电机励磁机

$$(HIP)_{I_1}$$
 k_1 $(LP1)_{I_2}$ k_2 $(LP2)_{I_3}$ k_3 $(GEN)_{I_4}$
图 1 600 MW 汽轮发电机组轴系模型
Fig. 1 Model of 600 MW turbine generator shafts

如图1所示,四自由度系统的运动微分方程为:

$$\boldsymbol{M}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{P}(t) \tag{1}$$

式中: θ 和 $\hat{\theta}$ 分别为角位移、角加速度;P(t)为激振力,对图 1 所示自由振动系统,P(t) = 0;M 和K 分别为质量矩阵和刚度矩阵,

由式(1)可得到该系统的固有频率[12],进而求

— 19 —

收稿日期:2010-03-03;修回日期:2010-05-27。

国家电网公司科技项目"电网与机组次同步振荡和发电机组 轴系扭振问题研究"。

解振型,模型前3阶固有频率分别为12.512 Hz, 21.330 Hz, 25.744 Hz。

分析过程中对所研究输电系统进行了等值处理,主要考虑电网中存在固定串联电容补偿元件和 可控串联电容补偿元件时电网的特性及机网耦合特性,考虑 600 MW 汽轮发电机组轴系扭振机械阻 尼,此时轴系模型的运动微分方程为:

$$\boldsymbol{M}\boldsymbol{\hat{\theta}} + \boldsymbol{c}\boldsymbol{\hat{\theta}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{P}(t)$$
(2)

式中:c为阻尼矩阵。

采用 PSCAD/EMTDC 对次同步振荡引起的机 组扭振进行仿真,获得次同步振荡激发过程发电机 电磁扭矩,假设机组在额定工况下运行时发生扰动。 由于串联电容及可控串联电容引起机网次同步振荡 的机理相当复杂,而一旦次同步振荡产生,对发电机 组造成直接影响的参数是发电机电磁扭矩的波动幅 值和频率。为此,通过施加不同的扰动电压信号来 仿真次同步振荡工况,以获得不同的电磁扭矩激励 过程。典型的发电机电磁扭矩(标幺值)响应见 图 2。





2 轴系瞬态响应与疲劳寿命分析

2.1 轴系瞬态响应分析

在机网耦合计算中,由于计算规模的限制,发电 机组轴系模型采用多质量块模型。分析发现,多质 量块模型能够较好地反映轴系扭振频率,对于电网 与轴系的耦合振荡分析,其分析精度主要取决于轴 系扭振频率的准确性,因此,多质量块模型可以较准 确地仿真实际机网耦合振荡过程。但是,轴系简化 集总使得模型对扭振振型的描述难以符合实际,无 法获得轴系局部部位的扭矩和应力,而在机组轴系 应力分析和疲劳寿命计算时,需要对轴系各个部位 的扭矩与应力进行分析。

为此,在机网耦合计算的基础上对实际 600 MW 汽轮发电机组轴系结构进行3 维实体模

化,建立基于分布质量模型的轴系有限元模型进行 响应求解计算。3 维弹性动力学的基本方程为^[13]:

$$\sigma_{ij,j} + f_i = \rho u_{i,u} + \mu u_{i,t} \tag{3}$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \tag{4}$$

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl} \tag{5}$$

$$\begin{cases} u_i = u_i \\ \sigma_{ij} n_j = \overline{T}_i \end{cases}$$
(6)

式(3)为动力平衡方程,式(4)为变形协调方程, 式(5)为材料物理方程,式(6)为边界条件,解的确定 还需要初始条件。

采用有限元方法求解轴系动力学方程,首先进行单元和节点的离散,对每个单元内部,等效惯性力 $P_{T}^{e}(t)$ 和等效阻尼力 $P_{e}^{e}(t)$ 分别为:

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{T}}^{\mathrm{e}}(t) = - \iint \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}} \rho \boldsymbol{N} \, \mathrm{d}x \, \mathrm{d}y \, \mathrm{d}z \, \boldsymbol{\dot{u}}^{\mathrm{e}} = - \boldsymbol{M}^{\mathrm{e}} \, \boldsymbol{\ddot{u}}^{\mathrm{e}} \quad (7)$$
$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{e}}(t) = - \iint \boldsymbol{N}^{\mathrm{T}} \mu \boldsymbol{N} \, \mathrm{d}x \, \mathrm{d}y \, \mathrm{d}z \, \boldsymbol{\dot{u}}^{\mathrm{e}} = - \boldsymbol{C}^{\mathrm{e}} \, \boldsymbol{\dot{u}}^{\mathrm{e}} \quad (8)$$

式中:N为相应单元的形函数;u^e为形函数的位移 向量;M^e和C^e分别为单元质量矩阵、单元阻尼矩 阵,组装得到整体质量矩阵和整体阻尼矩阵。

根据各节点的变形协调条件和动力平衡方程及 边界条件建立整体刚度方程,导出动力学问题的有 限元方程:

$$Mii + ci + Ku = P_{f}(t)$$
(9)
式中:P_{f}(t) 为激振力。

令 P_f(t)=0,求解方程特征值和特征向量,得到 轴系固有频率与振型,轴系前3阶扭振固有频率分 别为12.525 Hz,21.306 Hz,25.876 Hz。计算轴系 动力学响应时,激振力采用机网耦合仿真计算结果 (见图 2),得到轴系瞬态响应和稳态响应后,分析轴 系各截面扭矩响应。汽轮机-发电机联轴器两端截 面扭矩瞬态响应和稳态响应分别见图 3、图 4。



联轴器扭矩





Fig. 4 Time domain result of torque in the coupling between the low pressure cylinder and the generator under the shaft's steady-state response

2.2 轴系危险部位应力与寿命损耗分析

分析得到轴系各截面扭矩响应后,针对轴系局 部结构特点进行应力和疲劳计算。

分析 600 MW 汽轮发电机组轴系结构,主要考 虑主轴各个轴颈及连接部位的应力集中,计算发现 位于该类型汽轮机低压缸 2 和发电机连接部位的应 力集中现象明显,次同步振荡发生时承受的交变扭 矩也较大,经疲劳寿命计算后确定该部位是整个轴 系的疲劳危险部位。汽轮机-发电机联轴器结构由 主轴、联轴器和销键装配而成。应力计算分析考虑 各部件过盈装配接触条件和材料非线性关系,得到 结构在不同扭矩下的应力分布。比较不同部位的应 力值随扭矩变化的规律,得到主轴和联轴器结构疲 劳危险点分别位于主轴和联轴器的键槽末端^[14]。

基于轴系瞬态响应计算和结构应力分析,对次 同步振荡引起的轴系疲劳损伤进行评估,考虑次同 步振荡激励过程的瞬态响应,计算采用雨流法计数, 应用 Miner 疲劳累积损伤理论评估损伤。对于轴 系扭振响应过程,瞬态过程中扭矩波动值逐渐增大 (见图 3),单次脉动载荷下引起的疲劳损伤也逐渐 增大。在次同步振荡持续较长时间时,稳态阶段引 起的轴系寿命损伤将占很大的比例(见图 4)。研究 中将对瞬态阶段和稳态阶段引起的轴系疲劳寿命损 耗分别进行分析。

3 电网和机组参数对轴系寿命的影响

为分析次同步振荡对机组寿命的影响,针对电 网和机组参数对系统进行了疲劳寿命研究,主要考 虑次同步振荡幅值与频率的影响。

基于第2节对机网耦合的分析,次同步振荡的 激励过程电磁扭矩的波动幅值逐渐增大(见图3), 经过约60s的瞬态响应过程,到达稳态。取前60s 作为瞬态响应过程分析其疲劳寿命损耗。次同步振 荡持续存在,进入稳态阶段后,取单次脉动循环载荷 进行疲劳寿命分析。

由于引起次同步振荡的扰动类型多样,不同扰 动难以相互比较。计算分析和现场实际运行数据都 发现,电网引起的机组扭振幅度与作用在发电机上 的电磁扭矩直接相关。为此,采用发电机上的电磁 扭矩波动值作为次同步振荡的特征幅值,以电磁扭 矩波动频率作为次同步振荡的特征频率。

采用将不同幅度电磁波动扭矩加载到轴系响应 计算模型的方法得到轴系瞬态响应,根据第2节提 出的疲劳寿命分析方法进行寿命损耗分析。固定次 同步振荡频率为21.3 Hz,计算得到不同特征幅值 (标幺值)下的疲劳损伤,如图5、图6所示。









根据计算结果分析寿命损耗与特征幅值的关系:对于瞬态阶段,在特征幅值小于 0.025 1 时,联 轴器寿命损耗大于主轴寿命损耗,特征幅值大于 0.025 1 时,主轴寿命损耗大于联轴器寿命损耗;对 于稳态阶段,考虑单次循环载荷引起疲劳损伤,特征 幅值小于 0.023 6 时,联轴器寿命损耗大于主轴寿 命损耗,特征幅值大于 0.023 6 时,主轴寿命损耗大 于联轴器寿命损耗。

由此可见,对于次同步振荡引起的轴系次同步 振荡,在小幅扰动时,汽轮机-发电机联轴器结构疲 劳寿命损耗将由联轴器决定;在特征幅值大于 0.0236时,稳态阶段疲劳损耗将由主轴决定;在特 征幅值大于 0.0251时,瞬态阶段和稳态阶段的疲 劳损耗都由主轴决定。

分析发现,在该扭振频率下整个轴系的疲劳寿

-21 -

命损耗最大部位即是汽轮机-发电机联轴器部位, 于是对整轴系的疲劳损耗也有上述规律。也就是 说,在特征幅值小于某特定值时,联轴器疲劳损伤大 于主轴疲劳损伤;在特征幅值大于该值时,主轴疲劳 损伤将大于联轴器疲劳损伤。不同的是,瞬态阶段 疲劳损伤的分界点晚于稳态阶段,即当次同步振荡 幅值逐渐增大时,稳态振荡阶段的轴系疲劳危险点 将首先发生转移。分析轴系危险点和确定危险点疲 劳损伤对于机组寿命管理具有重要意义。

由于主轴与联轴器的材料不同,其力学性能存 在差异。在过盈装配中,主轴和联轴器在受扭时,局 部应力存在差别。在不同波动扭矩下,主轴与联轴 器的应力载荷谱不同,主轴部位的应力值较联轴器 部位小,载荷脉动量比联轴器部位大。在不同特征 幅值的次同步振荡工况下,主轴部位疲劳损伤随特 征幅值增加明显,联轴器部位疲劳损伤随特征幅值 增加较慢。从设计上考虑,由于联轴器更换成本比 主轴更换成本低,因此主轴比联轴器部位更加重要。 在出现轴系疲劳损伤分界点时,对运行调整非常重 要。一旦超过临界值,轴系疲劳危险点发生转移,主 轴首先发生疲劳失效,这将造成严重的损失。

基于上述分析,机组运行和寿命管理中必须考 虑发生次同步振荡时的寿命损耗,由于电网干扰的 客观存在,大型发电机组在设计中通常会预留 30% 的设计寿命来承担各种电网扰动工况。即使这样, 发生接近轴系固有扭振频率附近时的次同步振荡时 所消耗的寿命仍相当可观。

分析研究结果可以用于评估次同步振荡对轴系 疲劳寿命的影响、分析机组所能承受的电网干扰的 容许值等,为机组安全运行提供参考建议。

4 结语

由电网干扰引起的次同步振荡对轴系疲劳寿命 有着显著影响,本文从机网耦合分析出发,研究了轴 系在次同步振荡下的扭转和危险部位疲劳寿命,重 点分析了次同步振荡幅值和扰动频率对轴系疲劳寿 命累积的影响。

在次同步振荡幅值增大时,所研究的 600 MW 汽轮发电机组轴系疲劳危险点发生从汽轮机-发电 机联轴器到主轴的转移。不同扭振激励频率下发生 疲劳危险点转移的分界点所对应的特征幅值不一 致,越接近轴系固有扭振频率,分界点所对应的特征 幅值就越小。分析研究对轴系寿命管理、电网运行 调整具有参考价值。

参考文献

[1] 周孝信,郭建波,胡学浩,等.提供交流 500 kV 线路输电能力的

实用化技术和措施. 电网技术,2001,25(3):1-6.

ZHOU Xiaoxin, GUO Jianbo, HU Xuehao, et al. Engineering technologies and measures for improving the transmitting capability of 500 kV transmission lines. Power System Technology, 2001, 25(3): 1-6.

- [2] 周孝信,郭建波,林集明,等.电力系统可控串联电容补偿.北京: 科学出版社,2009.
- [3] 徐政,张帆. 托克托电厂串补送出方案次同步谐振问题的计算和 分析. 中国电力,2006,39(11):21-26.
 XU Zheng, ZHANG Fan. SSR analysis of series compensation transmission scheme for Tuoketuo Power Plant. Electric Power, 2006, 39(11): 21-26.
- [4] 杨煜,陈陈.伊敏一大庆 500 kV 输电系统次同步谐振分析—— 兼论发电机轴系共振频率.电网技术,2000,24(5):10-12.
 YANG Yu, CHEN Chen. SSR in Yimin-Daqing 500 kV transmission system. Power System Technology, 2000, 24(5): 10-12.
- [5] 刘世宇,谢小荣,王仲鸿. 我国火电基地串补输电系统的次同步 谐振问题. 电网技术,2008,32(1):5-8.
 LIU Shiyu, XIE Xiaorong, WANG Zhonghong. SSR problem in compensated transmission system of thermal power bases in China. Power System Technology, 2008, 32(1): 5-8.
- [6] WALKER D N, BOWER C E J, JACKSON R L, et al. Results of subsynchronous resonance at Mohave. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(5): 1878-1889.
- [7] Torsional interaction between electrical network phenomena and turbine-generator shafts [R]. Palo Alto, CA, USA: Electric Power Research Institute. 2006: 1-5.
- [8] ROSARIO D A, KHALID T. Generator shaft keyway cracking failure investigation// Proceedings of the 9th EPRI Steam Turbine/Generator Workshop, August 22-24, 2005, Denver, CO, USA.
- [9] IEEE Committee Report. Fourth supplement to a bibliography for the study of subsynchronous resonance between rotating machines and power systems. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(3): 1276-1282.
- [10] 沈玲岩. 电气扰动下大型汽轮发电机组轴系扭转振动的分析与 对策[D]. 北京:清华大学,1994.
- [11] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group of the System Dynamic Performance Subcommittee. Terms, definitions and symbols for subsynchronous oscillations. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(6): 1326-1334.
- [12] 倪振华. 振动力学. 西安: 西安交通大学出版社, 1989.
- [13] 王勖成. 有限单元法. 北京:清华大学出版社,2003.
- [14] JIANG Dongxiang, HONG Liangyou, HUANG Qian. Shaft crack analysis and diagnosis for the 600 MW steam turbine generator. Key Engineering Materials, 2009, 834(413/414): 591-598.

刘 超(1986—),男,博士研究生,主要研究方向:旋转 机械故障诊断。E-mail: chao-liu08@mails. tsinghua. edu. cn

蒋东翔(1963—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要 研究方向:动力系统故障诊断。E-mail: jiangdx@tsinghua. edu. cn

谢小荣(1975—),男,副教授,主要研究方向:柔性输配 电系统、电力系统分析与控制。

(下转第84页 continued on page 84)

(上接第 22 页 continued from page 22)

Fatigue Damage of Turbine Generator Shafting Caused by Subsynchronous Oscillations

LIU Chao¹, JIANG Dongxiang¹, XIE Xiaorong², HONG Liangyou¹

(1. State Key Lab of Power Systems, Department of

Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The risk of sub-synchronous oscillation (SSO) increases as increasing numbers of power electronic devices in power networks are being used to improve the systems' transmission capacity. The possible SSO phenomenon in power networks in China is analyzed based on the study of a 600 MW turbine generator shafting. The torsional vibration is analyzed based on the coupled system between units and the network; then the fatigue damage is studied based on the stress analysis and fatigue cumulation. The network disturbance amplitude and frequency are studied because they have significant impacts on shafting fatigue damage. The results can provide useful information in support of the unit's life cycle management and efficient evaluation of the permissible value of network disturbances.

This work is supported by State Grid Corporation of China.

Key words: sub-synchronous oscillation; turbine generator; torsional vibration; fatigue damage