

一种用于次同步谐振研究的电力系统外网等值方法

岑海凤¹, 王西田², 杨煜³, 赵勇³

(1. 广州供电局, 广东 广州 510000; 2. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 3. 南方电网技术研究中心, 广东 广州 510623)

摘要: 针对结构复杂的串补输电系统的外网采用何种方法等值及等值后系统保留多大规模这一问题, 基于现有的对次同步谐振模式在电网中的传递特性的认识, 提出了一种适用于次同步谐振研究的电力系统外网等值方法。根据短路等效阻抗及等值前系统平衡运行状态, 确定外网等值参数, 并结合次同步谐振研究结果的参数敏感性对等值参数进行适当处理。以系统频率阻抗作为评价指标确定外网合适的等值规模。该方法简单方便, 易于实现, 适用于结构复杂的串补输电系统的次同步谐振评估分析。通过南方电网的应用算例验证得出, 采用该方法进行外网多点等值时等值参数的简化处理及等值规模的判定方法对次同步谐振研究结果的影响很小, 从而说明了该方法的有效性。

关键词: 次同步谐振; 外网等值; 短路等效阻抗; 平衡运行状态; 系统频率阻抗

An equivalent method of external electrical network for subsynchronous resonance studies in power system

CEN Hai-feng¹, WANG Xi-tian², YANG Yu³, ZHAO Yong³

(1. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510000, China; 2. Dept of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. CSG Technology Research Center, Guangzhou 510623, China)

Abstract: Aiming at the problem that how to realize the equivalence of a complex-structured series compensated transmission system and what the system scale should be after the equivalence, based on the transfer characteristics of subsynchronous resonance (SSR) modes in electrical network, a power system external network equivalent method for SSR studies is proposed. The equivalent parameters of external network are obtained based on short-circuit equivalent impedances and the system equilibrating state before equivalence, and then the parameters are appropriately manipulated according to parametric sensitivity of SSR results. Using system frequency impedance as the evaluation index, the equivalent scale fitting for external network can be determined. The proposed method is easy to use and applicable to SSR studies of complex-structured series compensated transmission systems. With the application of the method in China Southern Power Grid, it is proved that simplification of equivalent parameters and determination of equivalent scale exerts little influence on SSR analysis results, thus the validity of the method is illustrated.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50807036).

Key words: subsynchronous resonance (SSR); external electrical network equivalence; short-circuit equivalent impedances; equilibrating state; system frequency impedance

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)04-0030-06

0 引言

串补输电技术作为现代电力工业大容量、远距离输电的一种经济有效的手段, 在国内外已普遍兴起, 而因此也引入了威胁系统安全稳定运行的次同步谐振 (Subsynchronous Resonance, SSR) 问题^[1]。1970年和1971年美国 Mohove 电厂先后两次经历了 SSR 引起的机组大轴损坏事故^[2]。近几年, 我国北方一些火电基地, 如托克托、上都、锦界等电厂的串补送出工程, 经研究发现存在不同程度的 SSR 问题^[3-5]。

为了使研究便于实现并在经济上合理有效, 电力系统的分析研究几乎都是基于等值简化的系统^[6]。对于串补输电系统的 SSR 研究, 一般定性地认为, 相对低频振荡 (区间模式) 而言, SSR 模式在电网中传播的区域有限, 因此采用适当规模的等值简化系统分析 SSR 是可行的, 这是用于 SSR 分析的系统等值的一个依据。针对“点对网”输电模式的串补输电系统, 往往将串补线路与负荷中心的联络点作为等值边界点^[7-8], 此时外网采用单点等值。然而, 到目前为止, 对于结构复杂, 尤其是串补输电线路附近存在电磁环网的系统, 采用何种方法等值及等值后系统保留多大规模合适这一问

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50807036)

题^[9-10], 国内外还没有定量的说法。适用于次同步谐振研究的外网等值, 是提高SSR研究结果精确度, 准确反映系统SSR风险程度的基础。

本文基于目前对SSR模式传递特性的认识, 提出一种适用于结构复杂的串补输电系统的SSR研究的外网等值方法, 并以南方电网为例对该方法的有效性进行验证。

1 适用于SSR研究的外网等值基本原理

基于等值简化的系统进行SSR研究时, 在次同步频率范围内, 尤其是SSR模态频率附近, 当用等效值表示的外网与实际系统的SSR等效阻抗几乎相同时, 即认为外网等值是有效的。

由于SSR是一个局部问题, SSR模式在电网中的传播范围不是太广, 当系统保留区域达到一定程度(或称有效传播区域)时, 即可认为系统SSR模式已衰减至非常微弱, 外网等值规模对SSR研究结果的影响也就可忽略不计, 若继续扩大系统保留区域, 那么从待研究机组来看, SSR模态频率附近的系统等效阻抗几乎是一致的, 并且此时采用基于工频下的短路等效阻抗来表征外网也是合理的。

系统平衡运行状态参数作为SSR分析的条件之一, 也是影响SSR模态阻尼的一个重要因素^[11]。目前, 国内进行SSR分析时, 等值点电源参数普遍采用基准值近似表示, 即对于500 kV串补系统, 其等值点电源电压通常设为 $\vec{V} = 525\angle 0^\circ$, 当采用此参数进行等值后系统的潮流计算时, 其运行状态也往往偏离实际平衡运行点。因此, 为保证系统初始运行状态引起的研究结果与实际情况下的误差尽可能地小, 可基于等值前等值点平衡运行状态确定外网等值电源参数。

根据以上分析, 串补输电系统SSR研究中, 外网可等效为带阻抗支路的无穷大电源的形式, 采用短路等效及基于等值前系统平衡运行状态获取等值参数的同时, 以系统频率阻抗作为评价指标确定合适的外网等值规模。

2 适用于SSR研究的外网等值方法

2.1 外网等值参数

a) 等值阻抗

以短路等效阻抗表征外网, 当采用单点等值时, 等值参数较少, 网络连接简单。然而, 对于串补输电线路附近网络结构复杂的系统, 外网等值边界点较多, 如十几个, 等值点间的互阻抗支路可达几十甚至更多, 并会出现负电阻的现象。此时, 等值点间接线复杂, 容易导致出错, 并且对于时域仿真会

出现因负电阻引起仿真异常, 结果错误的问题。为解决这一问题, 以下通过SSR研究结果的参数敏感性分析, 得出互阻抗支路影响作用的一般规律, 从而对等值阻抗参数作进一步的简化处理。

外网多点等值时等值点自阻抗和互阻抗支路的连接如图1所示, 其中 $Z_{ii}, E_{ii}, \delta_{ii}$ 分别表示等值点 i 对应的自阻抗、等值电源的电压有效值及电压相角, $Z_{ij}, Z_{ik}, Z_{il}, \dots, Z_{in}$ 分别表示等值点 i 与等值点 j, k, l, \dots, n 之间的互阻抗。在基于系统线性化模型的小干扰稳定分析中, 两个等值点各自的自阻抗和相互间的互阻抗支路呈 Δ 连接。对实际系统来说, 由于高压输电线路电阻值远小于电抗值, 即 $R \ll X$ 。因此, 为方便分析, 在此首先忽略各阻抗支路的电阻。设两个等值点 i, j 自电抗分别为 X_{ii}, X_{jj} , 互电抗为 X_{ij} , 其支路连接可表示成图2实线部分所示的形式。

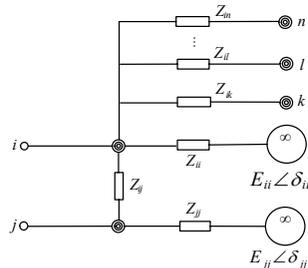


图1 等值点自阻抗、互阻抗支路的连接

Fig. 1 Connection between self impedance branches and mutual impedance branches

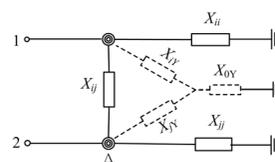


图2 Δ/Y 变换

Fig. 2 Δ/Y transformation

通过 Δ/Y 变换, Δ 型连接的 X_{ii}, X_{ij}, X_{jj} 可转化为 Y 型连接的 X_{iY}, X_{jY}, X_{0Y} , 如图2虚线所示, 其中:

$$\begin{cases} X_{iY} = \frac{X_{ii} X_{ij}}{X_{ii} + X_{jj} + X_{ij}} = \frac{X_{ii}}{\frac{X_{ii} + X_{jj}}{X_{ij}} + 1} \\ X_{jY} = \frac{X_{jj} X_{ij}}{X_{ii} + X_{jj} + X_{ij}} = \frac{X_{jj}}{\frac{X_{ii} + X_{jj}}{X_{ij}} + 1} \\ X_{0Y} = \frac{X_{ii} X_{jj}}{X_{ii} + X_{jj} + X_{ij}} \end{cases} \quad (1)$$

令 $X_{ij} = k_1 X_{ii} = k_2 X_{jj}$; $X_{ii} \leq X_{jj}$, 则: $k_1 \geq k_2$

$$\begin{cases} X_{iY} = \frac{X_{ii}}{1 + \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}} \\ X_{jY} = \frac{X_{jj}}{1 + \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}} \\ X_{0Y} = \frac{X_{ii}X_{jj}}{X_{ii} + (1+k_2)X_{jj}} < \frac{X_{ii}}{1+k_2} \leq \frac{X_{jj}}{1+k_2} \end{cases} \quad (2)$$

等值点 i, j 的对地阻抗分别为:

$$\begin{cases} X_{i0} = X_{iY} + X_{0Y} < \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}} + \frac{1}{1+k_2} \right) X_{ii} < X_{ii} \\ X_{j0} = X_{jY} + X_{0Y} < \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}} + \frac{1}{1+k_2} \right) X_{jj} < X_{jj} \end{cases} \quad (3)$$

由于 $X_{i0} < X_{ii}, X_{j0} < X_{jj}$, 若忽略互阻抗 X_{ij} , 等值点 i, j 的对地电抗分别以 X_{ii}, X_{jj} 近似表示时, 则等值点 i, j 的最大阻抗误差为:

$$\Delta X = \frac{\frac{1}{k_2}}{1 + \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}} \quad (4)$$

当 $k_2 \geq \frac{1}{\varepsilon} - 1$ (ε 为较小的正数) 时, 可验证 $\Delta X \leq \varepsilon$ 。

据以上推导, 当两等值点间互电抗大于两者自电抗最大值的 $\left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)$ 倍时, 若将该互阻抗支路予以忽略, 则等值点阻抗与没有忽略的情况相比, 其误差可保证在 ε 范围以内。由于系统模态阻尼与外网等值电阻并非呈线性关系, 因此, ε 仅表示外网等值阻抗容许偏差的概念, 并不指定所引起的系统 SSR 阻尼的误差。

基于线性化模型的小扰动稳定分析, 负电阻的存在不影响其正常分析研究, 但对于时域仿真, 互阻抗支路电阻呈负值将会导致仿真异常。由于通常情况下, 互阻抗支路的电抗大于自阻抗支路的电抗, 且存在 $R \ll X$, 通过 SSR 研究结果对负电阻的敏感性分析, 结果表明, 负电阻的影响非常小, 可忽略不计。

b) 等值电源

根据等值前大系统的潮流计算结果, 获取外网等值点 j, k, l, \dots, n 的有功功率、无功功率、电压有效值及其相角, 并结合外网等值阻抗参数, 按照电路基本理论依次计算图 1 所示的互阻抗支路

$Z_{ij}, Z_{ik}, Z_{il}, \dots, Z_{in}$ 及自阻抗支路 Z_{ii} 的功率, 从而进一步推算得到外网等值电源参数 E_{ii}, δ_{ii} 。

2.2 外网等值规模

以有待研究机组机端向网络侧看进去的系统频率阻抗作为确定外网等值规模的评价指标, 当 SSR 模态频率附近不同等值规模下的系统等效阻抗值非常接近时, 即可认为此时的外网等值规模是有效的。为更直观、精确地衡量不同等值规模下系统频率阻抗逼近程度, 下面提出量化的外网等值规模的判据。

定义范数 ΔJ 以表示外网不同等值规模下系统频率阻抗的误差, 设 $Z_1(f)$ 为外网某一等值规模下由待研究机组向网络侧看进去的系统频率阻抗, $Z_2(f)$ 为 $Z_1(f)$ 对应的等值规模的基础上扩大系统保留区域时的系统频率阻抗, 当外网等值规模达到一定程度时, 对于设定的 $\delta > 0$, 总会使式 (5) 在 $f \in (0, f_0)$ (f_0 为工频) 上成立。其中, $\|\bullet\|$ 表示范数运算。

$$\Delta J = \left\| \frac{Z_2(f) - Z_1(f)}{Z_2(f)} \right\| < \delta \quad (5)$$

若 $\bar{f}_i (1 \leq i \leq n)$ 表示待研究机组的 n 个次同步扭振频率 f_i 的补频率, 则式 (5) 可进一步具体为:

$$\Delta J = \max_{1 \leq i \leq n} \Delta J_i < \delta \quad (6)$$

其中, $\Delta J_i = \left| \frac{Z_2(\bar{f}_i) - Z_1(\bar{f}_i)}{Z_2(\bar{f}_i)} \right| (1 \leq i \leq n)$ 表示单个频率下的系统阻抗相对误差。

关于 δ 的取值, 则根据研究机组类型、系统网络结构等因素并结合研究目的的实际需要而定, 其设置值通常较小, 如 0.01~0.05。

当式 (6) 得到满足时, 即可确定合适的外网等值规模。

2.3 外网等值流程

基于以上理论及分析, 串补输电系统 SSR 研究的外网等值可按照图 3 所示流程进行, 其中初步的外网等值边界可按照现有 SSR 理论及成果进行设定。外网等值的具体操作步骤如下。

步骤 1: 以重点考察的机组和串补输电线路为中心, 向外保留距离串补线路一至两个主干网架电压等级 (如 500 kV) 的变电站的区域, 确定初步的外网等值边界。

步骤 2: 根据步骤 1 界定的初步的外网等值范围, 计算外网短路等效阻抗。

步骤 3: 判断外网等值边界点的数目, 当外网等值边界点仅有一个时, 直接转入步骤 4; 否则,

按以下步骤对外网等值参数进行处理。

步骤 3.1: 比较每两个等值边界点间互阻抗支路的互电抗与各个自电抗, 当等值边界点间的互阻抗支路的互电抗和自电抗之比大于阈值 $T = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right)$ (ε 是设定的外网等值阻抗的容许偏差) 时, 去除该条互阻抗支路。

步骤 3.2: 将保留下来的互阻抗支路中的负电阻记为零。

步骤 4: 基于等值前系统的平衡运行状态, 并结合等值边界点的等值阻抗, 确定外网等值电源参数。

步骤 5: 在原来的外网等值规模的基础上, 以重点考察的机组和串补线路为中心向外扩大系统保留区域, 如保留串补输电线路周围的电磁环网, 并基于以上等值方法得到新的等值规模下的外网等值参数。当两种等值规模下由待研究机组机端向网络侧看进去的系统频率阻抗满足式 (5) 所示的外网等值规模的判据时, 即说明所采用的外网等值规模的有效性。否则, 重复步骤 5, 继续扩大系统保留区域进行对比分析。

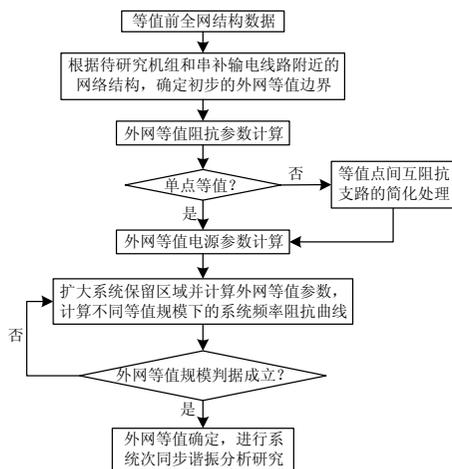


图 3 外网等值流程图

Fig. 3 Flow chart of external electrical network equivalence

3 算例验证与应用

以南方电网为例, 将本文所提出的外网等值方法应用到墨江-红河、砚山-崇左串补对邻近的小龙潭、巡检司电厂机组的 SSR 风险评估分析中。

3.1 南方电网 SSR 分析的外网等值

据南方电网 2009 年丰大方式下的 BPA 结构数据, 全网共有节点 4 975 个, 支路 5 811 条, 小龙潭、巡检司电厂各开一台 300 MW 机组接入 500 kV 网

络。在此, 为考察墨江-红河及砚山-崇左串补与附近的小龙潭、巡检司电厂机组间的 SSR 作用, 首先界定初步的外网等值边界, 如图 4 所示, 外网等值边界点有 5 个。接着, 按照图 3 所示流程对外网进行等值, 并按 $\varepsilon = 0.1$ 对等值阻抗进行简化处理。为确定外网有效的等值规模, 需对比不同等值规模下系统的频率阻抗特性。因此, 在图 4 所示的等值规模基础上向外扩大系统保留区域, 考虑电磁环网的作用, 如图 5 所示, 其中等值边界点增加至 13 个, 图 4、图 5 对应的两种等值规模下由巡检司机组机端向网络侧看进去的系统次同步频率阻抗特性曲线如图 6 所示。

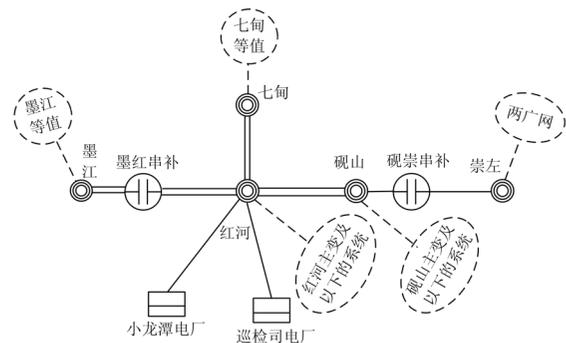


图 4 初步的外网等值边界

Fig. 4 Primary equivalent boundary

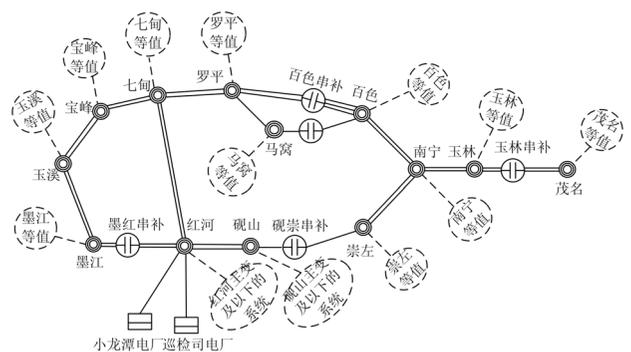


图 5 考虑电磁环网的外网等值边界

Fig. 5 External electrical system equivalence considering electromagnetic ring network

由图 6 可看出, 在次同步频率范围内, 图 4、图 5 对应的两种等值规模下的系统频率阻抗非常接近。为量化分析, 设 $\delta = 0.01$, 根据式 (6) 计算这两种外网等值规模下系统频率阻抗相对偏差 ΔJ , 结果如表 1 所示。其中, 小龙潭、巡检司电厂开机的 300 MW 机组轴系均采用 3 质块模型 (高压缸转子 HIP、低压缸转子 LP 及发电机转子 GEN), 机组轴系各有两个次同步扭振频率。

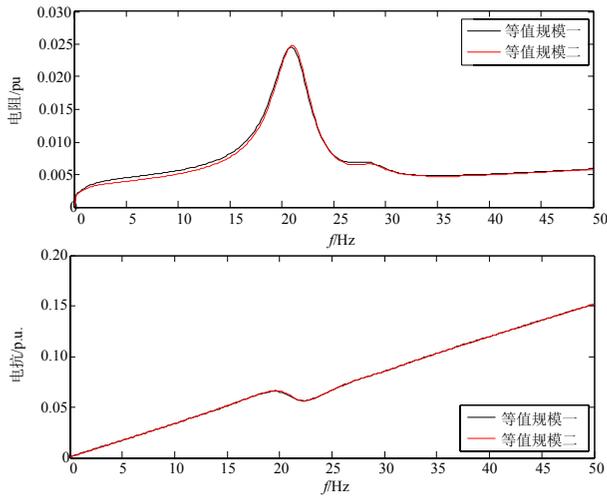


图 6 由巡检司机组机端向网络侧看进去的系统次同步频率阻抗特性曲线

Fig. 6 System equivalent impedance vs. frequency as viewed behind from the Xunjiansi generator terminal

表 1 外网不同等值规模下的系统频率阻抗偏差
Tab.1 System frequency impedance error under different equivalent scales of external electrical network

机组次同步扭振频率/Hz		系统频率阻抗偏差		
		ΔJ_1	ΔJ_2	ΔJ
小龙潭机组	$f_1 = 22.42$	0.001 2	0.007 2	0.007 2
	$f_2 = 32.90$			
巡检司机组	$f_1 = 19.64$	0.003 7	0.009 5	0.009 5
	$f_2 = 26.51$			

显然，不论是对于小龙潭机组还是巡检司机组，式（6）所示的外网等值规模的判据成立，因此图 4、

表 2 外网等值简化对系统 SSR 特征值的影响

Tab.2 Effects of equivalent simplifications of external electrical network on SSR eigenvalues

机组	SSR 模态特征值			
	方案一	方案二	方案三	方案四
小龙潭机组	$-0.001661+j26.315779$	$-0.001679+j26.315777$	$-0.001674+j26.315772$	$-0.001711+j26.315780$
	$-0.081149+j19.826919$	$-0.081174+j19.826916$	$-0.081162+j19.826909$	$-0.081478+j19.826909$
巡检司机组	$0.000164+j32.900315$	$0.000171+j32.900315$	$0.000177+j32.900319$	$0.000138+j32.900313$
	$-0.043007+j22.614853$	$-0.042970+j22.614818$	$-0.043014+j22.614846$	$-0.044287+j22.614822$

实部: 1/s, 虚部: Hz

3.3 基于等值简化系统的时域仿真分析

根据以上特征值分析结果，巡检司机组对应 32.9 Hz 的 SSR 阻尼呈较小正值，可能存在扭振不稳定问题。以下采用 PSCAD/EMTDC 时域仿真进行进一步的验证分析。

由图 7 所示的不考虑机组轴系机械阻尼的情况

图 5 对应的两种外网等值规模均是有效的。

3.2 基于南方电网的外网等值验证

本文所提出的外网等值方法中，为确定有效的外网等值参数及等值规模，采取了一定的处理措施，以下就这些措施对 SSR 阻尼特性的影响进行分析。

以图 4 所示的系统为例，暂不考虑小龙潭、巡检司机组轴系的机械阻尼作用，且按照 $\varepsilon = 0.1$ 及 $\delta = 0.01$ 设定阈值，建立等值后系统线性化模型以进行特征值分析，计算结果如表 2 所示。

方案一：对应于图 4 所示的外网等值规模，对外网等值，等值阻抗参数不作任何处理；

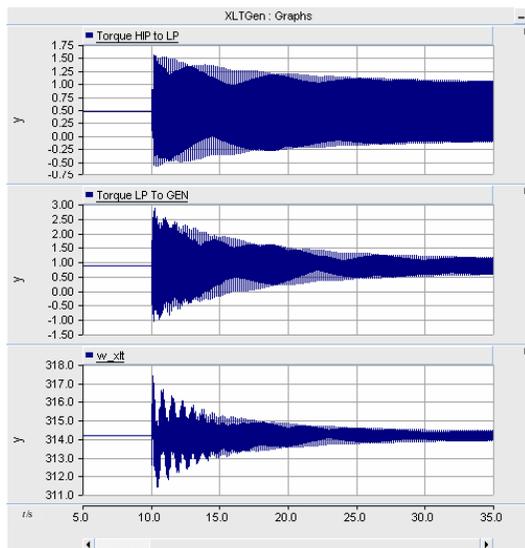
方案二：在方案一的基础上，按照设定的阈值，忽略部分互阻抗支路；

方案三：在方案二的基础上，将保留的互阻抗支路中的负电阻予以忽略；

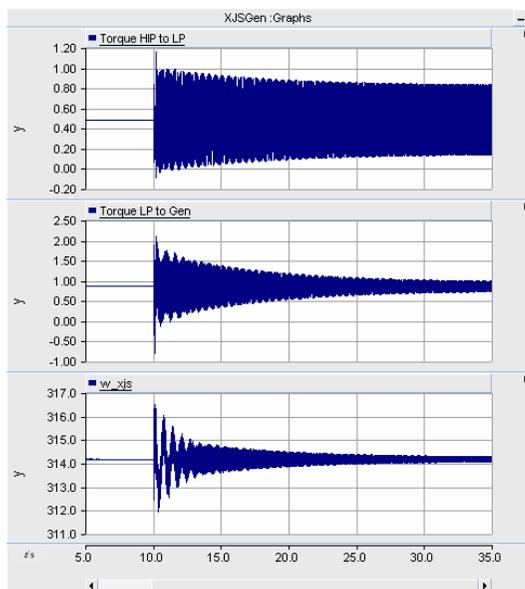
方案四：扩大系统保留区域，如图 5 所示，对外网进行等值，并对互阻抗支路较多及出现负电阻的问题进行了处理。

对比表 1 中方案一至方案三可看出，在同一等值规模下，对等值阻抗参数进行简化处理而引起的 SSR 模态特征值的虚部和实部的变化都很小。同时，对比表 1 中方案三和方案四可知，两种等值规模下 SSR 模态特征值的虚部相差很小，SSR 模态特征值的实部也比较接近。综上所述，特征值结果验证表明文中提出的外网等值过程对等值阻抗采取的简化处理措施及外网等值规模的判定方法是合理的，能够保证系统 SSR 结果的精确度和可靠性。

下红河交流母线发生瞬时性三相短路时机组轴系扭矩及转子转速响应可看出，故障后各机组，尤其是巡检司机组，其中高压缸 HIP 与低压缸 LP 间扭矩衰减缓慢，而两机组低压缸 LP 与发电机转子 GEN 间扭矩衰减较为明显。以上结果与特征值分析结果基本一致。



(a) 小龙潭机组轴系扭矩及转子转速



(b) 巡检司机组轴系扭矩及转子转速

图 7 故障时机组轴系的时域响应

Fig. 7 Time response of generator shafts to disturbances

4 结论

本文基于 SSR 是局部问题的这一特性, 提出一种针对串补输电系统次同步谐振研究的外网等值方法, 并以南方电网为例验证了其有效性。该方法易于实现, 参数获取简单, 具有较强的实用性, 可用于尤其是结构复杂的串补输电系统次同步谐振的评估分析。该方法的显著特征在于:

1) 外网等值参数的获取, 充分体现了外网等值阻抗及系统初始运行状态对 SSR 研究结果的影响作

用。针对外网多点等值时互阻抗支路较多并可能出现负电阻的问题, 提出了相应的解决措施。

2) 将次同步频率范围内, 尤其是 SSR 模态频率附近的系统频率阻抗作为指标以确定合适的外网等值规模, 方便、直观, 且尽可能地减小了外网等值规模对系统 SSR 研究结果的影响。

3) 当前各区域大电网结构数据基本以 BPA 数据格式保存, 当网络结构发生变化时, 只需对 BPA 数据进行相应调整, 即可按本文所提出的方法, 方便、快捷地确定新的网络结构下外网等值。

本文所提出的外网等值方法是基于 SSR 模式有效传播区域内外网负荷动态特性对 SSR 研究结果影响不明显的情况。当重点研究机组邻近大的负荷中心时, 负荷可能对 SSR 研究结果有较大影响, 此时外网采用何种方法进行等值简化还有待进一步深入研究。

参考文献

- [1] 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. Subsynchronous oscillation in electric power systems[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 1-4.
- [2] Hall M C, Hodges D A. Experience with 500 kV subsynchronous resonance and resulting turbine generator shaft damage at Mohave generating station[J]. IEEE Pub. 76CH1066-0-PWR, 1976: 22-29.
- [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[J]. 中国电力, 2006, 39(11): 21-26. XU Zheng, ZHANG Fan. SSR analysis of series compensation transmission scheme for Tuoketuo Power Plant[J]. Electric Power, 2006, 39(11): 21-26.
- [4] 李国宝, 张明, 郭锡玖, 等. 上都电厂串补输电系统次同步谐振解决方案研究[J]. 中国电力, 2008, 41(5): 75-78. LI Guo-bao, ZHANG Ming, GUO Xi-jiu, et al. The solution to SSR problem in Shangdu series compensation transmission system[J]. Electric Power, 2008, 41(5): 75-78.
- [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[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 5-8. LIU Shi-yu, XIE Xiao-rong, WANG Zhong-hong. SSR problem in compensated transmission system of thermal power bases in China[J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 5-8.
- [6] 刘峰. 电力系统外部等值理论及实用化探讨[J]. 继电器, 2007, 35(15): 67-71. LIU Feng. Elementary analysis of external network equivalence[J]. Relay, 2007, 35(15): 67-71.

(下转第 42 页 continued on page 42)

analytical method for the reliability evaluation of wind energy systems[C]. //IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON. 2007: 408-515.

[4] 吴义纯, 丁明. 风电场可靠性评估[J]. 中国电力, 2004, 37(5): 81-84.
WU Yi-chun, DING Ming. Reliability assessment of wind farm[J]. Electric Power, 2004, 37(5): 81-84.

[5] BILLINTON R, GUANG Bai. Generating capacity adequacy associated with wind energy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(3): 641-646.

[6] Wang P, BILLINTON R. Reliability benefit analysis of adding WTG to a distribution system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, 16(2): 134-139.

[7] Alexiadis M, Dokopoulos P, Sahsamanoglou, et al. Short term forecasting of wind speed and related electrical power[J]. Solar Energy, 1998, 63(1): 61-68.

[8] BOSSANYI E A. Short-term wind prediction using Kalman filters[J]. Wind Engineering, 1985, 9(1): 1-8.

[9] 丁明, 张立军, 吴义纯. 基于时间序列分析的风电场风速预测模型[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(8): 32-34.
DING Ming, ZHANG Li-jun, WU Yi-chun. Wind speed forecast model in wind farms based on the time series analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(8): 32-34.

[10] 杨叔子, 吴雅, 王治藩, 等. 时间序列分析的工程应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1991.

[11] Giorsetto P, Utsurogi K F. Development of a new procedure for reliability modeling of wind turbine generators[M]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1982, 102(1): 134-143.

[12] 杨蔚百, 戴景宸, 孙启宏. 电力系统可靠性分析基础及应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.

[13] 马振宇. 电网可靠性的蒙特卡洛仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 55-58.
MA Zhen-yu. Research of Monte Carlo simulation for power system reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 55-58.

[14] 马王晶, 王昉, 潘杰. 全概率公式在发电系统可靠性评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 69-72.
WANG Jing, WANG Fang, PAN Jie. Application of total probability formula in power generation system reliability evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 69-72.

[15] Reliability Test System Task Force of the IEEE Subcommittee on the Application of Probability Methods. IEEE reliability test system[J]. IEEE Trans on PAS, 1979, 98(6): 2047-2054.

收稿日期: 2010-03-06; 修回日期: 2010-06-04

作者简介:

吴昊(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统可靠性、状态估计等方面的研究; E-mail: wuhao0629@sjtu.edu.cn

张焰(1958-), 女, 教授, 主要从事电力系统规划及电力系统可靠性等方面的研究工作;

刘波(1978-), 男, 博士, 主要研究方向为分布式电源规划及稳定、电力系统故障分析。

(上接第 35 页 continued from page 35)

[7] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Comparison of SSR calculation and test results[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(1): 336-344.

[8] Agrawal B L, Demcko J A, Farmer R G, et al. Apparent impedance measuring system (AIMS)[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(2): 575-582.

[9] Anderson P M, Farmer R G. Series compensation of power systems[J]. Encinitas: Pblsh Inc, 1996.

[10] 宋述波, 叶利, 余芳, 等. 基于 MATLAB 的湖北电网次同步谐振分析[J]. 继电器, 2002, 30(10): 6-10.
SONG Shu-bo, YE Li, YU Fang, et al. Analysis of Hubei power system's SSR based on Matlab[J]. Relay, 2002, 30(10): 6-10.

[11] 杨帆, 王西田, 陈陈. 串联补偿输电系统次同步谐振的电气模态阻尼的参数敏感性分析[J]. 华东电力, 2005, 33(6): 22-27.
YANG Fan, WANG Xi-tian, CHEN Chen. Analysis of parametric sensitivity of electrical mode dampings for subsynchronous resonance in series compensated transmission system[J]. East China Electric Power, 2005, 33(6): 22-27.

收稿日期: 2010-03-04; 修回日期: 2010-12-04

作者简介:

岑海凤(1985-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统次同步谐振和轴系扭振; E-mail: cenhaifeng@hotmail.com

王西田(1973-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统机网相互作用的建模、仿真与控制。