

交直流互联电网动态等值的实用化方法

张一荻, 管霖

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 针对同调等值法等值过程中各个环节存在的若干问题, 提出了相应的实用化解决方法: 通过母线电压波动曲线的相关性分析, 基于母线电压同调辨识出外网保留节点; 针对网络化简过程中出现的不符合物理规律的参数, 采用人工删除高阻抗支路并适当微调附近节点上的负荷参数, 或将负电阻参数调整为0使负电阻提供的有功功率分配到线路两端节点上, 并调整两端节点有功负荷进行修正, 从而提高动态等值精度。针对等值后动态响应效果, 提出了分时段量化评估方法。以南方电网为实例, 分析验证了所提方法的有效性。

关键词: 动态等值; 节点保留原则; 动态效果评价; 交直流大电网; 电力系统

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.02.021

0 引言

随着高压直流输电、风电/太阳能并网、可控串补、SVC/STATCOM等含有电力电子开关电路的设备在高压电网中应用规模的不断扩展, 单纯依靠机电暂态仿真已经难以准确模拟电力系统的复杂动态响应行为。目前, 在交直流大电网的事故仿真和分析中, 已经越来越多地依靠PSCAD/EMTDC、RTDS等电磁暂态仿真工具。但基于三相瞬时值模型的电磁暂态仿真计算量过大, 始终难以满足大规模电网的故障扫描分析的要求, 普遍需要应用动态等值方法, 将与关注区域的电气距离相对较远、受扰动影响较小的局部电网进行动态等值, 以降低电网规模。

目前常用的动态等值方法为同调等值法。同调等值过程分3步: 第1步, 同调发电机判别; 第2步, 区域电网的静态等值(发电机母线和负荷母线的聚合); 第3步, 同调发电机及其控制器的聚合^[1-5]。同调等值方法已在众多文献中有广泛的研究^[1-15]。针对第1步工作, 文献[6]提出通过时域仿真直接比较发电机的转子角判别同调机群。文献[7]提出分析系统线性化模型的状态矩阵判断同调。第2步的电网静态等值主要有Ward^[8-9, 11]等值和REI^[10-11]等值等方法, 但现有的研究工作并未探讨外部区域电网在等值过程中应该保留哪些节点的问题。针对第3步, 文献[12]提出了一种基于加权平均法的相关机群详细模型参数聚合的方法, 并与频域法相比较, 获得了良好的效果。然而加权法获得的参数的动态性能往往与原始系统的动态性能有一定差别, 因此需要人工进行调整。文献[13]提出通过弱化励磁系统调压能力和调整原动机调速系统的调频能力, 对等值机的参数进行修正, 但并没有分析各种参数对动态性能

的影响及详细的调整方法。对于动态等值效果的评估, 往往只能通过目测等值前后的功角振荡曲线偏差来定性评价, 并没有一种统一量化的方法。目前的文献中也很少提及动态效果的评估。然而设计动态等值效果的量化评定指标, 其目的还在于指导动态等值参数的调整, 具有重要的工程实际意义, 因此迫切需要一种合理实用的动态性能评估方法。

本文结合实际需求, 提出了基于母线电压同调判别的外网保留节点辨识方法。针对电网等值的电流变换(CSR)法化简过程中产生的不合理网络参数, 提出了实用化的参数调整方法。针对等值后动态响应效果的评估, 提出了分时段量化评估方法。以南方电网为实例, 分析验证了算法的有效性。

1 等值外网保留节点判别方法

图1为系统分区示意图, 大规模交直流电网中动态等值的目标是: 内网故障时, 等值外网在接口母线上表现出的功率响应特性与实际外网的端口特性偏差尽可能小。

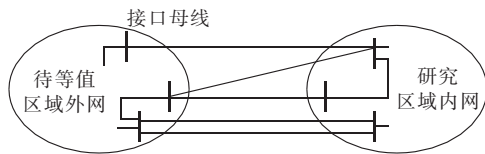


图1 系统分区示意图

Fig.1 Schematic diagram of system partition

研究表明, 只要外网发电机母线与接口母线有一定的电气距离, 在内网故障时, 外网发电机基本上都表现为同调机组。因此在外网静态等值中, 一般只保留了接口母线和一個等值的发电机母线。然而由此获得的等值网络在实际仿真中并不能很好地模拟外网发电机和负荷在内网故障时的受扰程度差异和动态行为, 使动态等值效果受到了影响。等值实践表明, 适当增加等值网中的保留节点往往能有效地

改善等值效果。本文第 5 节的实例就说明了这一点。本节据此提出了一种基于节点电压相关分析的保留母线识别方法。

1.1 电压波动曲线的相关性分析

判断内网故障时,外网各母线受扰程度的差异是判定保留母线的主要标准。通过在邻近接口母线的内网设置严重扰动,仿真获得外部网络各母线的电压幅值波动曲线后,可利用以下相关系数的概念判断任意 2 条母线电压波动的相似程度,从而识别出母线分群模式。

记 $[0, T]$ 时段内母线 i, j 的电压曲线为 $u_i(t)$ 和 $u_j(t)$,它们的相似程度可以用下式度量:

$$D = \min_b \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [u_i(t) - bu_j(t)]^2 dt \right\} \quad (1)$$

若优化参数 b 后能使 $D=0$,则认为 $u_i(t)$ 和 $u_j(t)$ 完全相似。

为求最优解,可令 $\frac{dD}{db}=0$,求出:

$$b = \frac{\int_0^T u_i(t)u_j(t)dt}{\int_0^T u_j^2(t)dt} \quad (2)$$

代入式(1),得:

$$\frac{TD}{\int_0^T u_j^2(t)dt} = 1 - \left[\frac{\int_0^T u_i(t)u_j(t)dt}{\sqrt{\left[\int_0^T u_i^2(t)dt \right] \left[\int_0^T u_j^2(t)dt \right]}} \right]^2 \quad (3)$$

令:

$$r_{ij} = \frac{\int_0^T u_i(t)u_j(t)dt}{\sqrt{\left[\int_0^T u_i^2(t)dt \right] \left[\int_0^T u_j^2(t)dt \right]}} \quad (4)$$

r_{ij} 即为任意 2 条曲线 $u_i(t)$ 和 $u_j(t)$ 的归一化相关系数,其大小间接地反映出 D 的大小。当 $r_{ij}=1$ 时,2 条曲线完全相关;当 $r_{ij}=0$ 时,2 条曲线不相关;当 $r_{ij}=-1$ 时,2 条曲线的变化趋势完全相反。因此,可以用 r_{ij} 的大小表示 $u_i(t)$ 和 $u_j(t)$ 的接近程度。 r_{ij} 越接近 1, $u_i(t)$ 和 $u_j(t)$ 越相似。设定阈值 ε ,若 $r_{ij}>\varepsilon$,则可以认为 2 条母线属于电压同调母线群。 ε 值直接影响到识别的结果: ε 值选择过小会识别出过多的同调母线,无疑会增大网络规模,影响仿真效率; ε 值选择过大,则不能够有效地识别出同调母线,从而影响仿真的精度。因此 ε 值的选择要兼顾网络规模及等值效果。

1.2 电压同调判别和节点保留原则

设外部网络中共有 n 个母线节点,可以由式(4)计算出任意 2 条母线 i 和 j 电压波动曲线的归一化相关系数,由此得到母线的相关系数矩阵:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \cdots & r_{2n} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & \cdots & r_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

显然,相关矩阵是对称矩阵,只需要计算其上三角矩阵的元素即可。

进一步对 $\mathbf{R}$ 进行 0、1 离散化,即 $r_{ij}>\varepsilon$ 时取 1,反之取 0,则可清晰地得出母线同调组。推荐的等值网保留节点为各母线群中与接口母线电气距离最近的节点。通过保留这些节点,能在不大幅增加网络规模的前提下有效提高动态等值的精度。

2 等值网络参数的校正方法

目前常用的电网动态等值方法有:Ward 静态等值和 REI 等值。其中负荷母线多采用 CSR 法处理。2 类方法实际上都属于高斯消去法的范畴。

在动态等值过程中,若移置前后负荷所在节点的电压波动相近,则带来的误差相当小。但采用 CSR 法化简后,得到的网络参数会存在一些不符合物理规律的值,包括负电阻支路、不合理的线路波阻抗等,为电磁暂态仿真建模带来了困难。对此需要人工进行调整,具体问题和处理方式说明如下。

a. 等值网中,任意 2 个保留节点间都会生成等值的线路或者变压器支路。这些新生成的支路中有很一部分阻抗值很大,因而支路上流通的功率很小。对此,在保证等值精度的前提下,可以人工删除高阻抗支路,并适当微调附近节点上的负荷参数,就能在保持潮流等值精度的基础上,进一步简化网络。

b. 等值网中新生成的支路常存在负电阻参数,这是由等值时负荷转移过程中的负荷遗失造成的。由于许多严格遵循物理约束的电磁暂态仿真软件(如 RTDS)中都不允许负电阻参数的存在,本文采用的方法是人工将负电阻参数调整成为 0,将负电阻提供的有功功率分配到线路两端节点上,对应调整节点有功负荷,保持调整后的稳态潮流不变。

3 发电机参数聚合

发电机参数聚合过程包含 5 个环节的聚合:发电机机械参数、发电机电磁参数、调速器和原动机、发电机励磁系统、电力系统稳定器(PSS)。

发电机电磁回路参数 $X_d, X'_d, X''_d, X_q, X'_q, X''_q$ 及暂态、次暂态时间常数是发电机的共有参数,可以通过频域拟合的方法计算出来。

发电机励磁和调速控制系统则不同,同调机群内的发电机控制模型往往并不一致^[14],为此,等值机的控制模型选择及其参数拟合就成为发电机聚合的关

键性问题。

综合考虑等值精度和等值计算速度因素,本文提出了一种工程上实用的等值机模型选取和参数聚合方法。

首先,等值机的控制模型按以下判据选择:

a. 如果该机群内采用同一模型的发电机容量所占比例超过 50%,则等值机控制模型采用该模型;

b. 如果机群内有 2 组控制模型对应的发电机群容量比重均较大且比较接近,则取与接口母线电气距离更近的发电机控制模型为等值机控制模型;

c. 以上条件均不成立时,取与接口母线电气距离最近的发电机控制模型为等值机控制模型。

无论如何选择,内网故障时,等值网的接口母线动态响应与原网络始终存在差异。在网络静态等值环节不变的情况下,通过对等值机参数的合理调整可以在一定程度上减少等值误差。一般调整原则参见表 1。

表 1 等值参数调整方法
Tab.1 Adjustment principle of equivalent generator parameters

参数类型	对动态响应特性的影响	调整方法
电磁回路参数	影响跌落电压	成比例增大或减小
励磁系统参数	影响曲线的幅值和周期	适当调整时间常数和增益
PSS	影响曲线的阻尼	适当调整时间常数和增益
原动机与调速器	影响系统稳态频率	适当调整等值机调速器的调差系数

将该方法应用于南方电网这种大规模电网的等值实践表明,由此获得的等值系统的动态响应和原始系统的动态响应非常接近,较好地满足了工程精度的要求。

4 等值效果评价

对等值效果的评估中,稳态潮流的等值效果可以直接通过节点电压和支路潮流的偏差反映。但对动态响应的等值效果则只能通过目测等值前后的功角振荡曲线偏差来定性地评价。合理设计动态等值效果的量化评定指标,其目的还在于指导动态等值参数的调整。本文根据动态响应曲线不同阶段的特点提出了分时段^[15]的动态等值效果评估指标。

4.1 第一摆振幅误差指标

当发电机参数及其励磁控制参数选择不当时,功角摇摆曲线的第一摆会出现较大的偏差。第一摆的幅值误差有效反映了等值机参数设置的合理性。本文将其作为误差指标指导等值机的参数调整。

误差指标采用相对值形式,第一摆误差定义为:

$$E_{\text{FSE}} = \frac{M_{\text{ES}} - M_{\text{OS}}}{M_{\text{OS}}} \tag{6}$$

其中, M_{ES} 、 M_{OS} 分别为等值网和原网络的第一摆幅值。

4.2 基于 Prony 分析的振荡模式误差指标

针对多个周期的振荡衰减过程,应用 Prony 分析,可以有效地获得各振荡模态的频率、阻尼比等关键特征。振荡模式和模态的差异反映了发电机机械特征参数和 PSS、调速系统等环节的参数偏差。不同的振荡模式对应不同时间常数的控制环节,因此不同模式上的偏差可用于指导相应控制环节的参数调整。

为此,本文根据原始系统和等值系统主导振荡模式频率和阻尼比的误差定义了 2 个综合误差指标:频率误差指标和阻尼比误差指标分别如式(7)、(8)所示。

选定一台等值机,设置 m 个内部系统扰动,取每次扰动下等值机与平衡机的功角摇摆曲线,将原系统被等值机群中一台大容量代表性机组与平衡机的功角摇摆曲线进行 Prony 分析和比较,得出:

$$E_f = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{f_{\text{Ei}} - f_{\text{Oi}}}{f_{\text{Oi}}} \right| \tag{7}$$

$$E_{\xi} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{\xi_{\text{Ei}} - \xi_{\text{Oi}}}{\xi_{\text{Oi}}} \right| \tag{8}$$

其中, f_{Ei} 、 ξ_{Ei} 为第 i 种故障下等值网的动态响应曲线的主导振荡频率和阻尼比; f_{Oi} 、 ξ_{Oi} 为第 i 种故障情况下原网络动态响应曲线的主导振荡频率和阻尼比。

5 算例分析

5.1 算例简介

本文方法已成功应用于含有 8 交 5 直并联输电通道的 2011 年南方电网丰大极限方式的电网等值。等值系统中保留南方电网 500 kV 主网架,广东电网保留全部 500 kV 主变,负荷等值到 500 kV 变电站的 220 kV 母线。云南、贵州、广西、海南电网的发电机和负荷等值到变电站的 500 kV 母线上。本文以其中深圳宝安换流站附近的 500 kV 紫荆站和鹏城站之间的 220 kV 及以下局部环网的等值为例,说明本文模型和算法的应用过程和有效性。

待等值外网结构见图 2。该区域 220 kV 电网连接在紫荆和鹏城 2 个 500 kV 变电站之间形成电环网。片区共有 22 个 220 kV 节点,发电机 8 台。其中,节点 2 为紫荆站 220 kV 母线,节点 7 为鹏城站 220 kV 母线,属于边界接口母线。发电机采用详细模型,区域负荷比例如下:恒阻抗负荷 30%、恒电流负荷 40% 和恒功率负荷 30%。

5.2 保留节点分析

在保留内网边界的 500 kV 紫荆—鹏城线路紫荆侧设置如下故障:第 10 周期发生三相短路故障,第 15 周期故障消失。得到受扰动后的外网各母线节点电压波动曲线。计算任意 2 条电压母线的归一化相关系数,形成 22×22 阶的归一化相关系数对称矩阵。

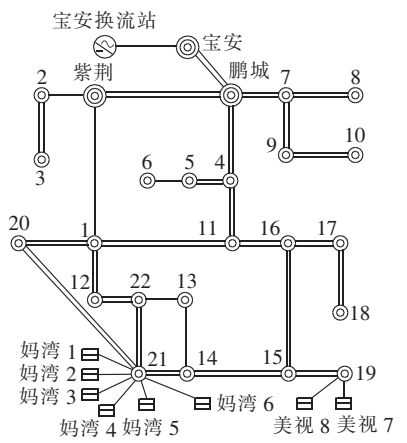


图 2 220 kV 紫荆—鹏城环网地理接线图
Fig.2 Geographical wiring diagram of Zijing-Pengcheng 220 kV network

1、2 和原网络中沙角 A 厂发电机相对于沙角 B 厂发电机的功角摇摆曲线对比情况如图 4 所示。可以看出,增加 1 个保留节点后,等值网的动态性能得到了极大改善。

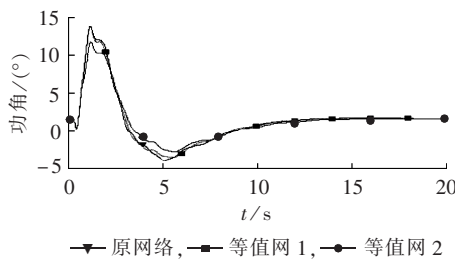


图 4 紫荆—鹏城三相永久性故障发电机 SJA4 转子摇摆曲线比较
Fig.4 Comparison of rotor swing curves of generator SJA4 during permanent three-phase fault of Zijing-Pengcheng network

计算结果显示,节点相关系数值均在 0.8 附近。阈值分别选取 0.78、0.79、0.8、0.81、0.82,利用前文提出的保留判据,分别得到 5 个不同的等值网。通过设置相同故障,观察各等值网的动态性能。仿真结果表明:阈值 $\varepsilon=0.8$ 时得到的等值网在保留较少外部节点的同时,其动态响应非常接近原网络,因此该算例阈值选取 0.8。相应的判据为相关系数 $r_{ij}>0.8$,则认为电压同调,相关矩阵对应项值设为 1;相关系数 $r_{ij}<0.8$,则认为电压非同调,记为 0。形成了 22×22 阶只包含 0 和 1 这 2 种元素的对称矩阵。

5.3 动态特性评估与等值参数调整

对于网络等值过程中产生的部分不合理的负电阻支路参数,按照第 2 节处理方法消除负电阻的同时,保证了消除前后潮流的一致。

对等值网 1 和 2,分别在内网设置紫荆—鹏城三相永久性故障进行仿真测试。由第一摆幅值误差指标的测算结果如下:

$$E_{FSE1} = \frac{M_{ES1} - M_{OS}}{M_{OS}} = \frac{13.7511 - 13.7722}{13.7722} \times 100\% = -0.15\%$$
$$E_{FSE2} = \frac{M_{ES2} - M_{OS}}{M_{OS}} = \frac{11.5629 - 13.7722}{13.7722} \times 100\% = -16.04\%$$

对等值网 1 和 2,分别在内网设置 5 组故障进行仿真测试。利用 Prony 分析等值网 1、2 和原网络发电机的转子摇摆曲线,提取主要振荡模式的频率和阻尼比。对应指标误差如下: $E_{f1}=0.2131\%$, $E_{f2}=1.5324\%$, $E_{\zeta1}=0.2245\%$, $E_{\zeta2}=1.6482\%$, 其中 E_{f1} 、 $E_{\zeta1}$ 是等值网 1 和原网络的频率和阻尼比误差, E_{f2} 、 $E_{\zeta2}$ 是等值网 2 和原网络的频率和阻尼比误差。

对比分析表明:保留节点 15 后的等值网 1 各项动态响应特性指标均更加接近原网络。

表 2 进一步给出了原网络和等值网 1 在多个内

表 2 临界切除时间比较
Tab.2 Comparison of critical fault-clearing time

故障类型	原网络/s	等值网 1/s	绝对误差/s
穗增线穗侧三相短路	0.28	0.28	0
肇砚线肇侧三相短路	0.44	0.42	-0.02
安鹏线安侧三相短路	0.22	0.22	0
北增线北侧三相短路	0.30	0.30	0
鹅博线鹅侧三相短路	0.22	0.24	0.02
穗增线穗侧单相短路	0.82	0.84	0.02

根据相关系数矩阵中非对角位置的非零元素,判断出各节点电压的同调集合。计算结果表明,待等值的外部系统可分为 2 个同调群: {15,19}, {其他节点}。

考虑到节点 15 与接口母线(紫荆、鹏城站的 220 kV 母线)的电气距离比节点 19 更近,决定保留节点 15。其他节点集合中,边界接口母线 2 和 7 予以保留。应用网络等值,得出的外网等值网络如图 3(a)所示。

如果不考虑以上节点保留算法,仅根据同调机判别进行等值,则外网发电机将归并为一台发电机,并仅保留一个等值发电机母线。应用网络等值,得出的外网等值网络如图 3(b)所示。

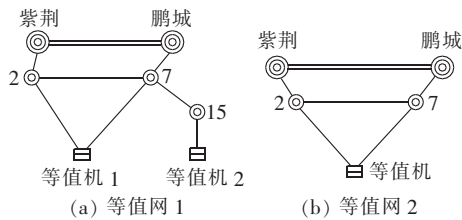


图 3 等值网
Fig.3 Equivalent network

为校验等值网络的动态性能,在内网设置三相短路故障 N-1 故障,比较等值前后的动态行为。仍以紫荆—鹏城线路三相永久性故障为例,等值网

网典型故障下临界切除时间对比情况,绝对误差的绝对值均在 0.02 s 以内,表明等值网很好地保留了原网络的动态性能。

6 结论

a. 本文以交直流电网为蓝本,详细介绍了同调等值法应用于交直流电网动态等值各个环节中的实用化方法。针对动态等值外部节点的保留原则,兼顾等值效果和仿真效率,首次提出了基于母线电压同调的外网保留节点辨识方法。通过计算任意 2 条母线的相关系数,能够有效地对受扰后的母线进行同调性划分。

b. 针对 CSR 法化简过程中产生的不合理参数,提出了人工调整和修正的方法。另外,综合考虑等值精度和计算速度因素,本文提出了一种工程上实用的动态等值机模型选取和参数聚合方法。该方法应用于南方电网,取得了良好的效果。

c. 针对等值效果评估和误差分析,本文以 Prony 算法作为动态性能的提取工具,采用分时段的方法来确定各扰动时段的误差指标。仿真结果表明该方法简单实用,直观地显示了动态等值的效果。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [3] ZHOU Haiqiang, JU Ping, YANG Hui. Dynamic equivalent method of interconnected power systems with consideration of motor loads[J]. Science China-Technological Sciences, 2010, 53(4): 902-908.
- [4] 周海强,鞠平,孔德超,等. 基于机电距离的聚类方法在动态等值中的应用[J]. 电力系统自动化,2008,32(3):14-17.
ZHOU Haiqiang, JU Ping, KONG Dechao, et al. Application of clustering method based on electromechanical distance between different units in power system dynamic equivalence[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 14-17.
- [5] 许剑冰,薛禹胜,张启平,等. 电力系统同调动态等值的述评[J]. 电力系统自动化,2005,29(14):91-95.
XU Jianbing, XUE Yusheng, ZHANG Qiping, et al. A critical review on coherency based dynamic equivalences[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 91-95.
- [6] PODMORE R. Identification of coherent generators for dynamic equivalents[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(4):1344-1354.
- [7] NATH R, LAMBA S S, PRAKASE R K S. Coherency based system decomposition into study and external areas using weak coupling[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(6):1443-1449.
- [8] 诸骏伟. 电力系统分析[M]. 北京:水利电力出版社,1995.
- [9] 孙宏斌,张伯明,相年德. WARD 型等值的非线性误差分析与应用[J]. 电力系统自动化,1996,20(9):12-16.
SUN Hongbin, ZHANG Boming, XIANG Niande. Nonlinear error analysis and application of WARD-type equivalent[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(9): 12-16.
- [10] 邓长虹,陈允平,张俊潇. REI 法在动态等值中的应用与改进[J]. 高电压技术,2005,31(7):55-60.
DENG Changhong, CHEN Yunping, ZHANG Junxiao. Application and amelioration of REI in the dynamic equivalence[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(7): 55-60.
- [11] 刘峰. 电力系统外部等值理论及实用化探讨[J]. 继电器,2007, 35(13):67-71.
LIU Feng. Elementary analysis of external network equivalence[J]. Relay, 2007, 35(13): 67-71.
- [12] 胡杰,余贻鑫. 电力系统动态等值参数聚合的实用方法[J]. 电网技术,2006,30(24):26-30.
HU Jie, YU Yixin. A practical method of parameter aggregation for power system dynamic equivalence[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 26-30.
- [13] 姚海成,周坚,黄志龙,等. 一种工程实用的动态等值方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(19):111-114.
YAO Haicheng, ZHOU Jian, HUANG Zhilong, et al. A practicable method for dynamic equivalence[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(19): 111-114.
- [14] 蒋平,戴列峰,黄霆,等. 频域法在励磁系统参数辨识中的应用[J]. 电力系统自动化,2001,25(16):30-33.
JIANG Ping, DAI Liefeng, HUANG Ting, et al. Application of frequency domain method to parameter identification of excitation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(16): 30-33.
- [15] 高松,贺仁睦,马进,等. 电力系统动态仿真误差评定准则研究[J]. 电力系统自动化,2006,30(4):6-10.
GAO Song, HE Renmu, MA Jin, et al. Error criteria on power system dynamic simulation validation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 6-10.
- [16] 王刚,张伯明. 电力系统外网在线动态等值方案[J]. 电网技术, 2006, 30(19):21-26.
WANG Gang, ZHANG Boming. External on line dynamic equivalents of power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 21-26.
- [17] 周海强,鞠平,宋忠鹏,等. 基于动态相似性与等值缓冲区的电动机动态等值方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(13):24-27.
ZHOU Haiqiang, JU Ping, SONG Zhongpeng, et al. A dynamic equivalent method for induction motors based on dynamic similarity and buffer zone[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(13): 24-27.
- [18] 温柏坚,张海波,张伯明. 广东省地区电网外网等值自动生成系统设计[J]. 电力系统自动化,2004,28(20):77-79.
WEN Bojian, ZHANG Haibo, ZHANG Boming. Design of a real-time external network auto-equivalence system of sub-transmission networks in Guangdong[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(20): 77-79.

作者简介:



张一荻

张一荻(1988-),男,河南驻马店人,硕士研究生,从事电网稳定与控制、电网仿真研究(E-mail:zhangyidi18@163.com);

管霖(1970-),女,湖北孝感人,教授,从事电网稳定与控制、电网规划与可靠性研究(E-mail:lguan@scut.edu.cn)。

Practical dynamic equivalence of AC-DC interconnected power network

ZHANG Yidi,GUAN Lin

(School of Electric Power,South China University of Technology,Guangzhou 510640,China)

Abstract: Corresponding practical methods are proposed to solve the problems existing in different procedures of coherency-based equivalence. Correlation analysis is carried out for the bus voltage curves and the external nodes to be preserved are identified according to the bus voltage coherency. Different countermeasures may be applied to treat the unreasonable network parameters appeared during the process of network simplification;delete manually the branch with high impedance and fine-tune appropriately the load parameters of nearby nodes;adjust the negative resistance parameters to 0,distribute the reactive power provided by the negative resistors to both nodes of the line and adjust their active loads appropriately to improve the accuracy of dynamic equivalence. The time-division quantitative evaluation is proposed to assess the dynamic performance after equivalence. The practical example of South China Power Grid verifies the efficiency of the proposed methods.

Key words: dynamic equivalence; node preservation principle; dynamic performance evaluation; AC-DC system; electric power systems

(上接第 119 页 continued from page 119)

Fault diagnosis based on bispectrum and Hilbert-Huang transform for circuit breaker

LI Jianpeng,ZHAO Shutao,XIA Yanqing

(North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract: The bispectrum analysis of acoustic waves is carried for the normal and abnormal closing of circuit breaker,which shows that the energy distribution of its high frequency components may reflect the operational state of the circuit breaker. Hilbert-Huang transform analysis shows that,the high frequency components of acoustic signals last only for a short period. According to the energy distribution of high frequency components extracted from the empirical mode decomposition,a method of fault feature extraction based on the energy entropy of intrinsic mode functions is proposed. The energy entropy of 500~3 000 Hz intrinsic mode functions is taken as the criterion in the simulative experiments of circuit breaker fault diagnosis,which is immune to the influence of environmental noise of low frequency. Experimental results show the effectiveness of circuit breaker fault diagnosis based on the bispectrum analysis and Hilbert-Huang transform of acoustic signals.

Key words: electric circuit breakers; acoustic wave; noise; bispectrum; Hilbert-Huang transform; energy entropy; failure analysis