

Dynamic Equivalence of Electric Power System Based on RTDS

Shoutao Tian^{1,2}, Xiufang Gu¹, Yunmin Wang³, Xu Zhang¹

¹School of Electrical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot Inner Mongolia

²Economic Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumqi Xinjiang

³Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Hohhot Inner Mongolia

Email: 1579145827@qq.com

Received: Dec. 5th, 2017; accepted: Dec. 19th, 2017; published: Dec. 27th, 2017

Abstract

A scheme and implementation are supplied in order to establish a large scale simulation model in RTDS. This paper proposes the solutions and realization method for the dynamic equivalence. The basic thought is as follows: ranking generators based on the electrical distance and closeness of generators in the external system with the internal system; determining the power grid scope to realize wide-band equivalence in the external system according to the RTDS hardware processing capacity; and simplifying the external system including other remained power generators with the coherency-based dynamic equivalence approach based on electrical distance. Effectiveness of the proposed equivalence plan has been verified by comparison of static power flow and dynamic response before and after equivalence.

Keywords

Dynamic Equivalence, Electrical Distance, Broadband Equivalence

基于RTDS的电力系统动态等值研究

田寿涛^{1,2}, 顾秀芳¹, 王蕴敏³, 张旭¹

¹内蒙古工业大学电力学院, 内蒙古 呼和浩特

²国网新疆电力公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐

³内蒙古电力科学研究所, 内蒙古 呼和浩特

Email: 1579145827@qq.com

收稿日期: 2017年12月5日; 录用日期: 2017年12月19日; 发布日期: 2017年12月27日

摘要

为解决电力系统模型规模超出RTDS硬件资源的问题,提出了动态等值的思路 and 实现方法。主要思路为:根据电气距离按外部系统中发电机与内部系统的联系紧密程度进行排序,并结合RTDS硬件处理能力,确定实现外部系统中宽频等值的电网范围,而对含有其它发电机的外部系统按照基于电气距离同调等值法进行化简。通过比较等值前后的静态潮流和动态响应证明了所提方案的有效性。

关键词

动态等值, 电气距离, 宽频等值

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于计算机容量和仿真软件对电网规模的限制,直接对电力系统进行计算和分析是十分困难的,因此如何实现动态等值及提高其精度是一个重要的课题。动态等值的方法有:同调等值法、模式等值法、估计等值法[1]等。为提高等值的精度,对不同的等值方法提出了改进,如对于同调等值:提出在等值边界处加入基于 GrHDP 算法的动态补偿环节实时补偿同调系统与原系统间动态特性的差额[2]、利用节点灵敏度分析判断大电网同调等值中必须保留的关键节点[3]。对于估计等值法:提出基于相量测量的动态等值建模方法[4]。通常的动态等值中未考虑外部系统的高频特性,降低了动态等值暂态过程的精度。为此,宽频等值技术作为一项重要的技术被提出[5] [6] [7] [8] [9]。宽频等值技术通过拟合原始网络的频率特征,进而得到线性的等值网络去反应系统的高频动态特性,弥补了高频特性的失真。

为缩小外部系统等值规模,需要将其中的发电机做必要的聚类。通常采用机电距离来衡量发电机耦合强弱,以此作为聚类的指标[10]。文献[11]定义了复合机电距离,在某发电机惯性与其它机组接近时仿真精度较高。文献[12] [13] [14]分别从提高分群的准确性和计算量方面对发电机进行分群化简。

实时数字仿真装置(Real Time Digital Simulator, RTDS)是最普遍使用的电力系统实时数字仿真装置。RTDS 引入宽频等值技术(Frequency Dependent Network Equivalent, FDNE),为实现高精度动态等值提供了必要的基础。在 RTDS 硬件资源充足的条件下,FDNE 是实现大规模网络等值的有效途径。文献[15]指出 RTDS 对大电网仿真时进行等值或简化的必要性,通过实例验证了 FDNE 系统故障响应的准确性。文献[16]利用 BPA 的同调等值法将研究系统等值为若干个发电机和负荷,而对于研究系统内部的 220 kV 及以下的低电压等级网络采用 FDNE 保留了原始网络的较宽频率范围内的频率特性。

若 RTDS 硬件资源不足,如何在 RTDS 中实现电力系统动态等值的实现方案还鲜有研究。因此本文主要从 RTDS 的硬件资源处理能力以及对外网的等值方案入手,研究 RTDS 仿真平台实现动态等值的方案。

2. 等值思路

为实现在 RTDS 中建模仿真,采用的动态等值方法需保证等值前后系统的潮流和动态响应不变。

RTDS 中的 FDNE 模块能对外部系统进行有效地简化,并对其能进行很好地模拟,且具有非常高的

仿真精度，因此是实现电力系统动态等值的优选方法。但是也应注意到：FDNE 生成宽频等值模块前，必须在 RTDS 中建立详细的系统模型，而这无疑会占用硬件资源。若系统的规模太大，RTDS 将受到硬件资源 RACK 的限制，不可能实现对外部系统的等值。

为此本文提出一种既能充分利用硬件资源又能提高动态等值精度的方法，具体思路为：首先应尽可能利用 FDNE 等值优势来对外部系统进行化简。文献表明：影响电力系统稳定性的主要因素是发电机。因而将外部系统的发电机按对内部系统稳定性影响的差异进行排序、分组，在 RTDS 计算能力范围内将尽可能多的影响大的机组进行详细建模并形成 FDNE。而对其它发电机按同调方法进行化简，以保证更高的精度及 RTDS 仿真中硬件资源的有效利用。动态等值具体实施步骤如下：

1) 首先对 RTDS 仿真能力进行评估。计算其能承受的外部系统规模。

2) 运用电气距离按与内部系统联系紧密程度对外部系统中的发电机进行排序，并运用聚类法对发电机进行分类。将外部系统划分为与内部系统关系较近的系统部分(称为 I 系统)和较远的系统部分(称为 II 系统)。

3) 运用同调等值法对 II 系统进行化简。并将等值后 II 系统、内部系统、I 系统详细模型，在 RTDS 建模并完成编译。

4) I 系统生成宽频等值模块，将整个系统转化为内部系统、宽频等值模块和同调等值系统三部分。借助于 FDNE 的简化，使外部系统的规模得到缩减，且 RTDS 的硬件资源占用更少。

5) 形成 FDNE 后，RTDS 可以释放出更多的硬件资源。而由于同调等值发电机需要占用 RTDS 硬件资源，同时它的等值精度有限，因此为进一步提高等值精度和减少 RTDS 硬件资源的使用，可以按上述(2)~(5)步骤对同调前外部剩余系统继续形成 FDNE 模块和同调等值机。依此循环分析化简，最终可在 RTDS 实现大规模系统的等值分析。

3. 等值原理

3.1. 基于 RTDS 的宽频等值

RTDS 采用宽频等值技术 FDNE 提高仿真技术，如图 1 所示为 FDNE 示意图。

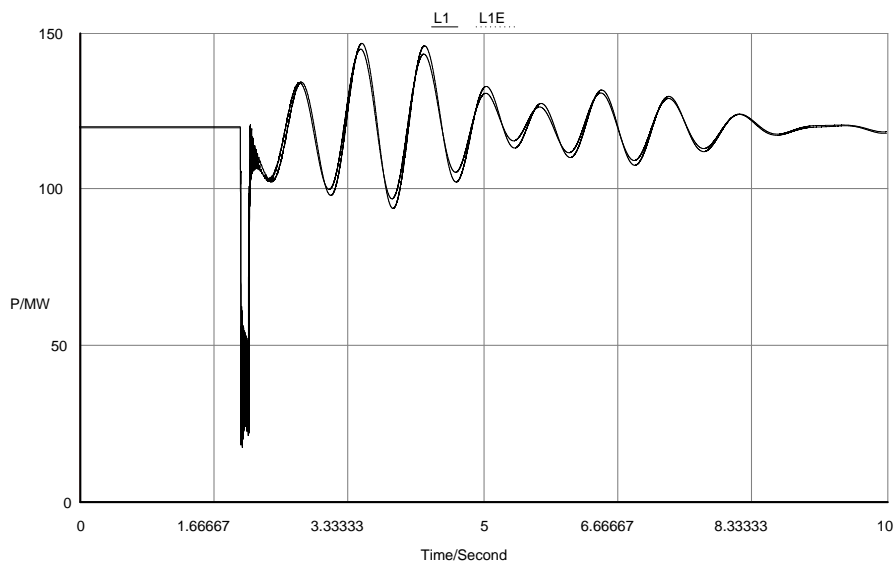


Figure 1. Structure of wide-band equivalent in RTDS

图 1. 宽频等值技术示意图

FDNE 由四部分组成：即内部系统(电磁暂态部分)、接口模块、TSA 模块(机电暂态部分)、FDNE 模块。各部分内容及功能为：

内部系统为重点研究的内容即保留的系统。

接口模块模块 a 实现电磁暂态与机电暂态的连接。

RTDS 中使用的机电暂态仿真程序，采用简单的线性算法来对系统方程进行求解，达到与实时仿真的步长相匹配。

FDNE 通过拟合原始系统频率响应特性来表征外部系统的高频动态特征。

基于 RTDS 的宽频等值表示为 FDNE + TSA，其中 FDNE 能表征外部系统中不同频率下的特性，TSA 能反映外部系统中的低频动态特性。

3.2. 基于电气距离的同调等值

设系统中的负荷用恒阻抗模型来描述。这样将初始系统收缩简化到 N 个发电机节点上，且每个节点由发电机和恒阻抗负荷来描述，根据导纳矩阵和潮流所提供的信息可计算各发电单元之间的电气距离，即

$$D_e(i, j) = \frac{1}{\frac{dP}{d\delta}(i, j)} \quad (1)$$

式中 $\frac{dP}{d\delta}(i, j) = E_i E_j (-B(i, j) \cos \delta_{ij} + G(i, j) \sin \delta_{ij})$ 。

电气距离表征系统中任意两个不同单元之间的相互关联程度，且与不同单元之间的相互关联程度成反比。

运用电气距离，再结合离差平方和方法对系统中的发电机进行聚类分析，将外部系统划分为若干个耦合子系统进行同调分群。然后对同调机母线采用恒功率的原则进行化简，再次采用电流变化法进行网络化简。其目的是使稳态潮流偏差为零的基础上，尽可能减小动态误差，最后用加权平均法对同调机的参数进行聚合。

4. 算例分析

选取 IEEE39 节点作为算例系统对所提出的等值方法和思路进行验证，系统结构如图 2 所示。

按照所提的思路和方法，其步骤为：

1) 选取内部系统为图 2 中虚线以上的部分，虚线部分以下为外部系统。

2) 根据 RTDS 中 2 个 RACK，4 块 GPC 板卡的处理能力可知：除内部系统外，外部系统至多能保留网络的元件为 4 台发电机，6 台变压器，19 条线路以及 7 个负荷。

3) 运用电气距离将对外部系统中的发电机与内部系统联系紧密程度进行排序，并运用聚类法对发电机进行分类，聚类结果如图 3 所示。

4) 根据 RTDS 硬件资源对外部系统元件的容纳能力，再结合系统的聚类树可得：将外部系统与内部系统较近电气距离的 2#、3#和 10#发电机放在 I 系统内，而其它发电机 4#、5#、6#和 7#相对于内部系统电气距离较远，因而可以将它们放到 II 系统中。在 II 系统中发电机间电气距离较近，并结合 RTDS 硬件资源处理外部系统的能力，这些发电机可以用一台等值机替代。这一步骤完成后，就可以将系统放入到 RTDS 中进行编译。

5) 等值结果

步骤 4)完成后，根据所提出的等值思路可知，与内部系统联系较为紧密的 I 系统运用宽频等值技术对其进行等值生成 FDNE。FDNE 模块包含 2#、3#和 10#发电机的网络部分，即图 3 中的实线所包围的

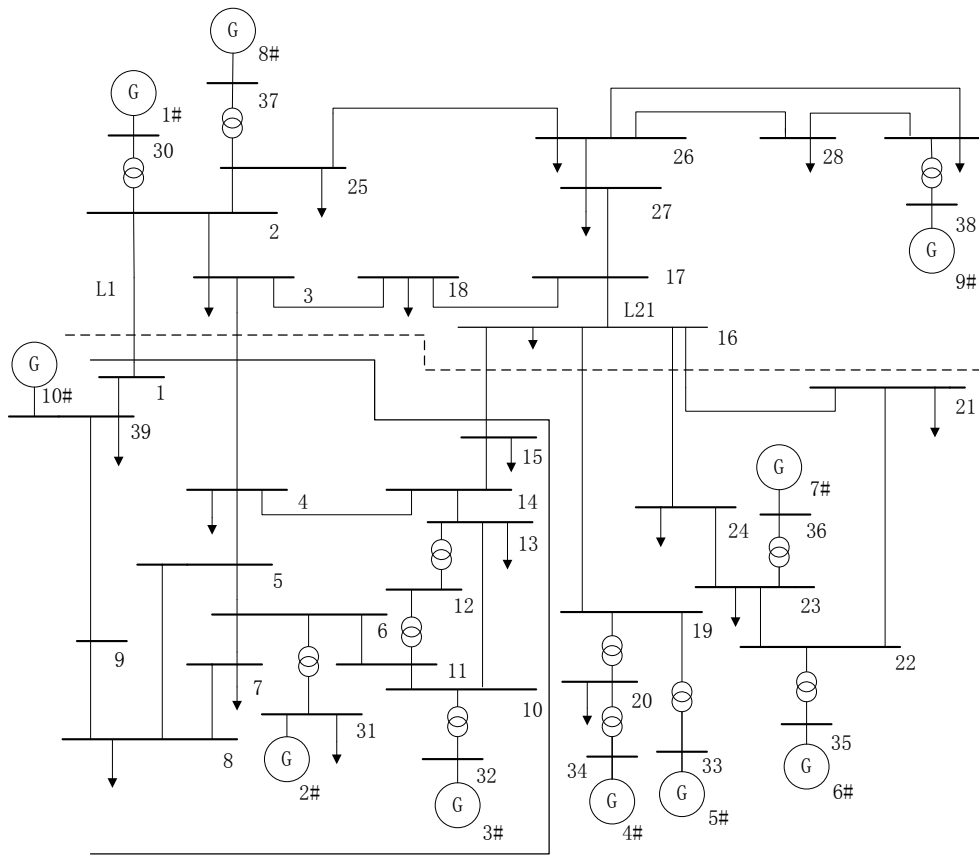


Figure 2. IEEE39 node system
图 2. IEEE39 节点系统

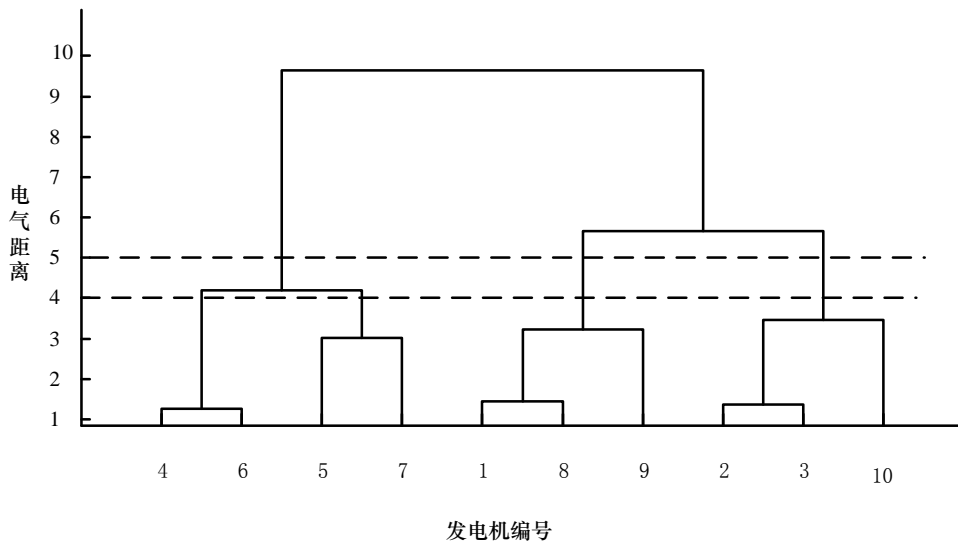


Figure 3. System clustering tree
图 3. 系统聚类树

区域。II 系统中发电机等值为一台机 G_{eq} 。此时原 IEEE39 节点系统等值为：内部系统、宽频等值模块、同调等值网络三部分。等值系统结构示意图如图 4 所示。

5. 等值前后系统变化情况比较

选取等值前后部分母线的电压、线路的潮流进行比较。

根据表 1 的数据可知, 等值前后系统的电压基本接近。由表 2 的对比数据可知, 等值后线路上有功功率与原系统吻合度非常高。

经计算节点 16 电压误差最大, 其绝对误差为 0.19%, 节点 16~17 的线路上有功功率误差为 1.5 Mw, 无功功率的误差相差最大, 为 1.75 Mvar, 这是由于它作为边界部分, 边界部分受外部系统影响, 但此误差满足动态等值工程精度的要求。

为验证大扰动下的等值效果, 选取边界线路 1~2 节点的 L1 和 16~17 节点的 L21 (图 2 中对这两条线路有标注) 的有功功率和无功功率作为监测变量。在内部系统 25 号节点母线处设置三相短路故障, 仿真时间为 10 s, 故障发生的时间在 2 s 时刻, 100 ms 后切除。图 5 为三相短路故障等值前后电气量的比较, 依次是线路 L1、L21 的有功功率、无功功率, 实线、虚线分别表示原系统和等值系统。

通过对三相短路故障的仿真测试可知, 在同一故障下, 等值前后系统的动态响应比较相近, 表明所提的动态等值方法能很好地保留原系统的动态特性。

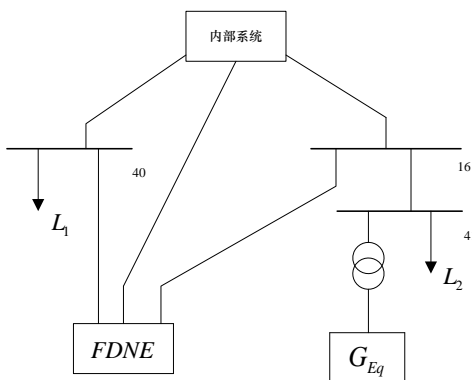


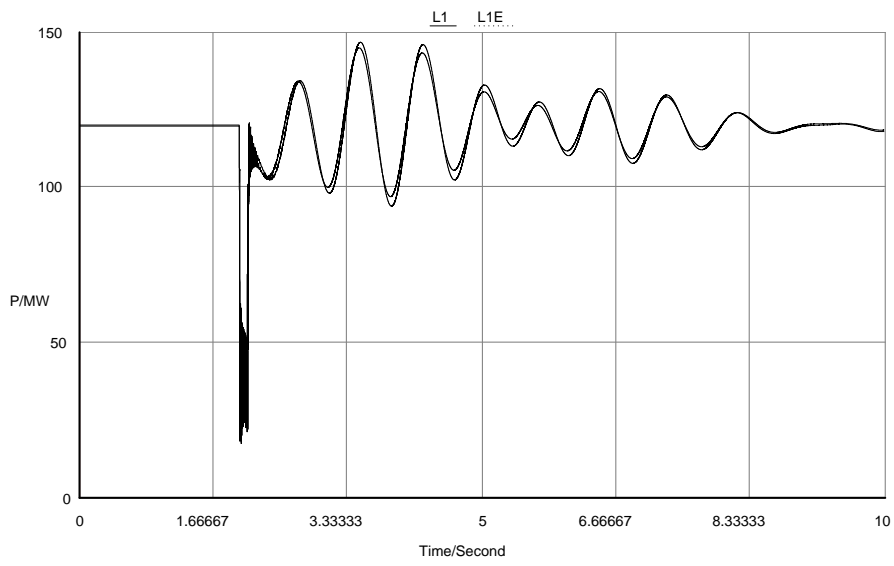
Figure 4. Demonstration of system equivalent
图 4. 等值系统示意图

Table 1. Comparison of voltage of buses before and after equivalence
表 1. 等值前后部分节点电压对比

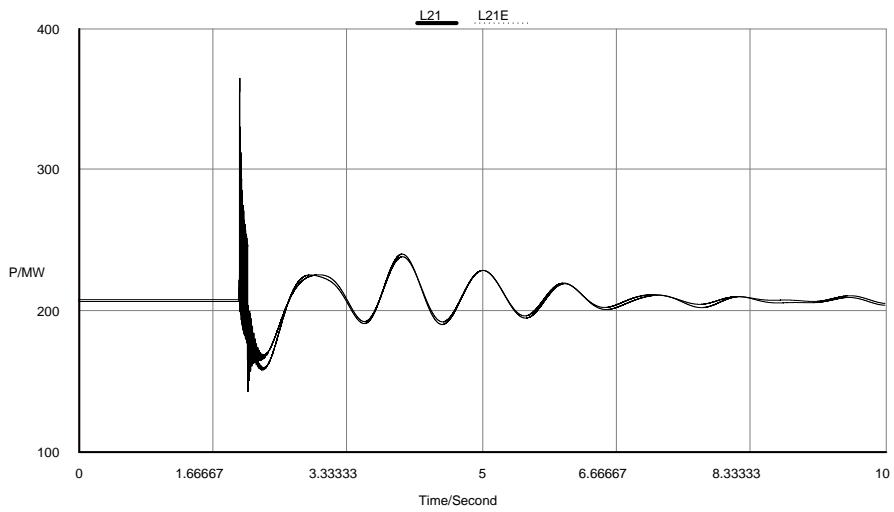
节点名称	等值前(Pu)	等值后(Pu)	绝对误差
2	1.052	1.052	0.00%
16	1.037	1.035	-0.19%
17	1.039	1.038	-0.09%
29	1.055	1.055	0.00%

Table 2. Comparison of power flow of transmission line before and after equivalence
表 2. 等值前后线路潮流比较

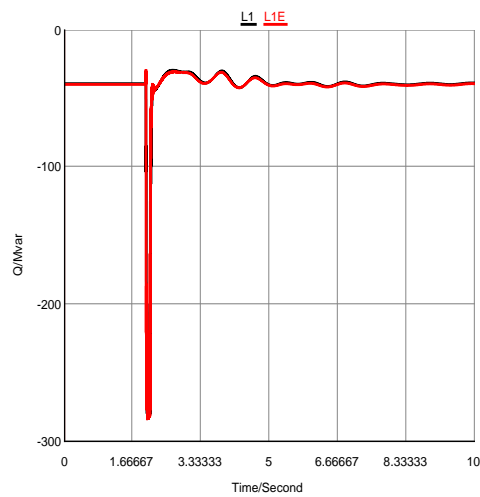
线路节点		有功功率(MW)		无功功率(Mvar)	
<i>i</i>	<i>j</i>	等值前	等值后	等值前	等值后
1	2	119.50	119.90	-39.72	-40.05
2	3	366.50	365.00	77.51	78.15
16	17	206.2	207.5	-47.52	-49.27
28	29	77.03	76.40	-41.95	-42.38



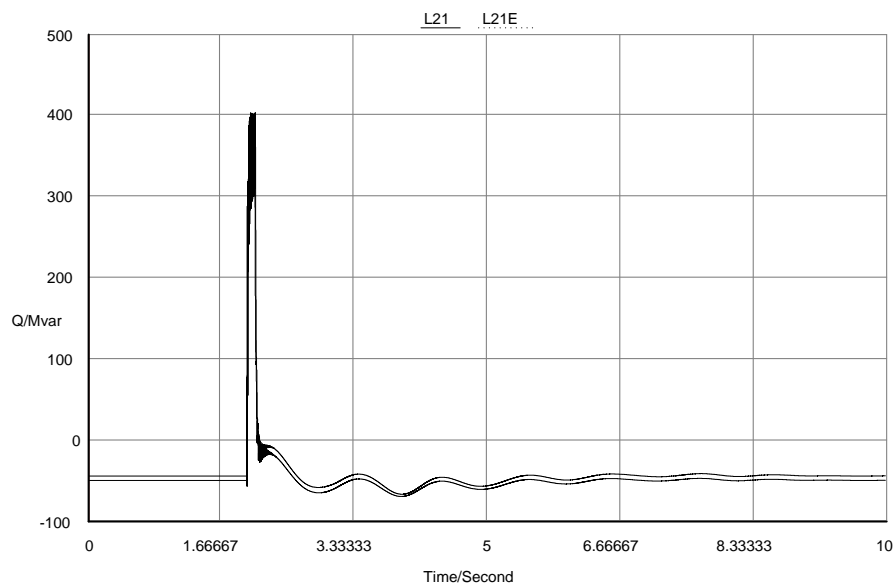
(a) L1 的有功功率比较



(b) L21 的有功功率比较



(c) L1 的无功功率比较



(d) L21 的无功功率比较

Figure 5. Comparison of ABC fault
图 5. 三相短路故障仿真对比

6. 结论

本文主要研究了在 RTDS 硬件资源一定条件下, 实现电力系统动态等值的思路 and 实现方案。论文的主要工作及结论包括:

- 1) 针对 RTDS 中仿真受其硬件资源限制的问题, 提出了等值的思路和方法。
- 2) 根据外部系统与内部系统联系紧密的关系以及 RTDS 的硬件资源的处理能力, 提出了基于 RTDS 宽频等值和基于电气距离的同调等值相结合的方法对外部系统进行有效的简化处理。
- 3) 通过等值前后系统的稳态潮流和动态响应的比较, 表明了所提方法的可行性和有效性。

参考文献 (References)

- [1] 鞠萍. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 杜治, 苏宇, 彭昌勇, 等. 基于多层次启发式动态规划算法的电力系统动态等值[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 1-9.
- [3] 武艳, 杨数强, 蒋志勋. 基于节点灵敏度分析的大电网等值研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015(10): 68-73.
- [4] 胡柏玮, 丁理杰, 刘新宇, 等. 基于相量量测的中小型水电集群动态等值方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 90-96.
- [5] Agrawal, R. and Thukaram, D. (2011) Identification of Coherent Synchronous Generators in a Multi-Machine Power System Using Support Vector Clustering. *International Conference on Power and Energy Systems (ICPS)*, Chennai, 22-24 December 2011, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICPES.2011.6156659>
- [6] Lin, X., Gole, A.M. and Yu, M. (2009) A Wide-Band Multi-Port System Equivalent for Real-Time Digital Power System Simulators. *IEEE Transactions on Power Systems*, **24**, 237-249. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.2007000>
- [7] Liang, Y., Lin, X., Gole, A.M. and Yu, M. (2011) Improved Coherency-Based Wide-Band Equivalents for Real-Time Digital Simulators. *IEEE Transactions on Power Systems*, **26**, 1410-1417. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2085456>
- [8] Bai, H., Zhang, P. and Ajarapu, V. (2009) A Novel Parameter Identification Approach via Hybrid Learning for Aggregate Load Modeling. *IEEE Transactions on Power Systems*, **24**, 1145-1154. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2022984>

-
- [9] Ramirez, A. (2009) Vector Fitting-Based Calculation of Frequency-Dependent Network Equivalents by Frequency Partitioning and Model-Order Reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **24**, 410-414.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.921139>
- [10] 李光辉. 面向实时仿真的大规模交直流混联电网动态等值研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [11] 王德林, 王小艳. 基于连续体模型的电力系统机电距离研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(22): 25-31+36.
- [12] 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(9): 14-17.
- [13] 王永贵, 卫志农, 孙国强, 等. 基于轨迹灵敏度和 FASTICA 的同调机群识别方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2014, 26(3): 14-19.
- [14] 冯康恒, 张艳霞, 刘志雄, 等. 基于广域信息的同调机群在线识别方法[J]. *电网技术*, 2014, 38(8): 2082-2085.
- [15] 丛宝丰. 宽频等值技术在大电网 RTDS 建模中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [16] 廖梦君. 基于 RTDS 的交直互联大电网仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2012.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8763, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: sg@hanspub.org