

电网网络等值方法分析与讨论

常喜强¹, 周悦², 梁静³, 孙谊嫒¹, 姚秀萍¹

(1. 新疆电力公司 电力调度中心, 新疆 乌鲁木齐 830002;

2. 武汉市供电公司, 湖北 武汉 430000; 3. 新疆电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:在大区电网通过交流互联的趋势下, 电网规模日益增大, 电网理论计算分析数据量、数据规模海量增加, 数据误差的大量累积造成数据分析结果可能出现偏差, 为解决电网规模与计算时间、速度之间的矛盾, 减少数据误差, 计算误差带来的不利因素, 需对电网计算数据进行有效而实用的等值。针对新疆电网连入西北电网海量数据的增加, 为增加计算精度、缩短计算时间, 减少计算误差, 就网络等值化简方法进行了综述, 并在此基础上对即将与西北主网联网的新疆电网进行了等值, 并就等值前后的稳定计算进行了对比, 并就误差做了分析, 得到了相应结论。

关键词: 电网; 网络等值; 新疆电网

Abstract: The interconnection of the large-area power grid has increased its scale. In order to solve the conflicts between the scale of the grid and the computing time, the effective and practical equivalence is the only solution. The grid equivalence methods are summarized. Based on the summarization, the equivalence of Xinjiang Power Grid which is about to interconnect with the Northwest Power Grid is carried out, and the results of stability calculation before and after the equivalence are compared. Then the error has been analyzed to obtain the corresponding conclusion.

Key words: power grid; network equivalence; Xinjiang Power Grid

中图分类号: TM744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0039-05

0 引言

随着中国电网建设向着大机组、特高压、超远距离输电、大电网方向发展, 电网规模越来越庞大。特别是随着“三华”电网形成后。近年来, 尽管计算机内存容量有了飞速发展, 目前无法很好的解决电力系统计算中日益庞大的网络结构数据量庞大, 计算速度慢的矛盾, 但电网规模日益增大, 电网理论计算分析数据量、数据规模海量增加, 数据误差的大量累积造成数据分析结果可能出现偏差, 为解决电网规模与计算速度之间的矛盾, 减少数据误差、计算误差带来的不利因素, 于是就需要在计算前, 特别是在在线计算这类对计算时间有严格要求的仿真计算前对实际电网进行等值简化, 将不需要详细研究的部分从系统中去除, 从而大幅降低求解问题的维数。在保证电网动态特性不变, 精度在一定范围内的情况下, 将电网规模减少, 减少数据规模误差, 缩短计算时间, 提高计算效率。

1 等值方法概述

在静态网络等值中, 常用的等值方法有 WARD 等值法以及 REI 等值法^[1, 2]。前者通过改进在等值后能有很好的有功和无功响应^[5], 非常适于实际应用^[3], 但是 WARD 等值及其改进等值法对于外网变化 (网络结果, 主要发电机节点等) 对内网的影响难以考虑, 导致难以反映实际电网运行情况^[5, 6]; REI 等值法的响应精度和稀疏性都不如 WARD 等值法, 并且具有固有的病态趋势不利于潮流收敛^[3]。

在动态等值中, 常用的等值方法有 3 种: 适应于离线计算的同调等值法^[7]和模态等值法^[8], 另外还有一种适应于在线计算的估计等值法。估计等值法基本是采用纯粹数学的方法进行, 其结果难以像同调等值法和模态等值一样具有清晰的物理概念, 但它计算速度快, 不需要外部系统详细数据, 适合作为在线计算的方法。在两种离线等值方法中, 同调等值法较模态等值法更适应于实际大型电力系统, 因而得到了更广泛的应用, 但由于其相关发电机聚合过程复杂,

因而会引入一定的拟合误差。

2 新疆电网数据等值方案

随着新疆电网与西北主网联网,新疆电网中出现了新的电压等级——750 kV。为了顺利开展新疆电网与西北电网联网计算分析,考虑到新疆电网与西北电网联网后,计算数据量大大增加,计算数值误差的增大,计算数据处理时间的增长,不利于安全稳定校核和电网主导特性的分析和研究,避免局部特性影响电网主导特性。

按照《电力系统安全稳定导则》、《国家电网公司安全稳定计算规定》中的有关网络数据等值的要求,开展了新疆电网数据等值的相关工作。以提高计算效率,减少数值计算误差及精度误差。

以同调等值法^[7]和模态等值法^[8]两种等值方法为基础,借鉴在线计算的估计等值法,将三者的优点有效结合,同时最大限度的避开此 3 种方法对有关条件的要求。充分考虑了工程实用性,在采用数学等值方法基础上,围绕电网运行实际特性,进行了修正。提出了新疆电网等值实用方案。

等值包括以下几个方面:电源等值、负荷等值、零序回路等值、无功补偿等值。

2.1 电源等值

针对不同的电源采取 3 种等值方法:直接与负荷抵消,等值为负荷,等值为电源,保留电源和负荷,如图 1 所示。

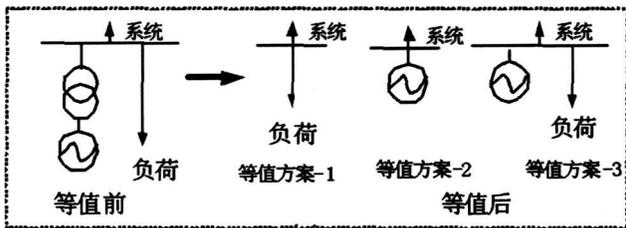


图 1 电源等值示意图

风电场等值,按照国家电网公司关于风电场接入的相关规定,将风电场按一定容量按照电力系统等值方法等值成若干台发电机组,并模拟仿真箱式变压器,以方便模拟和监视风电机组风电机组出口电压变化情况。

采用上述方法是综合考虑了发电机组在系统中的作用及稳定特性。

2.2 负荷等值

将负荷与补偿设备(低压电容、电抗器,高压电抗器)分别进行了相关的等值处理,考虑到负荷特性,低压电容、电抗器,高压电抗器的特性不同,进行了细化建模。

2.3 零序回路等值

在电力系统分析中,按照电网安全稳定导则要求,需进行单相瞬间故障进行校核分析,同时对于复杂故障如单相永久性故障也需在特定方式进行校核,同时对于非全相故障也需进行故障分析,这就牵涉到电网零序电网,即需要关注中性点接地方式和中性点接地网的等值。

在大多数省级电网中中低压网一般采取不接地系统。但是对于某些中压 110 kV 电网中,为保证零序保护的灵敏度,电网部分 110 kV 变电站接地。由于 35 kV 为不接地系统,故 110 kV 变电站仅 110 kV 侧接地。

新疆电网中地区电网基本为 220 kV 电网为核心,110 kV 电网为主干电网,大部分电源接入 110 kV 电网,110 kV 电网中部分变电站 110 kV 侧进行有效接地。因此 110 kV 等值时,需考虑零序电网的等值。

为分析等值方案,首先对 220 kV 变电站进行了研究和分析,220 kV 变电站中存在以下 3 种情况:高中压侧均接地,即 220 kV、110 kV 侧均接地;仅 220 kV 侧接地,110 kV 侧不接地;仅 110 kV 侧接地,220 kV 侧不接地。3 种情况在进行等值时需注意零序电网的变化,注意等值中的问题,存在不同的等值方案。

对于 110 kV 电网仅 110 kV 侧接地,35 kV、10 kV 侧不接地,为保证零序电网的完整性,对 110 kV 零序电网进行了等值和建模。保持原 110 kV 变电站主变压器中性点接地方式不变,增设中性点接地支路;设置和调整了相关的 R_1, X_1, R_0, X_0 参数,如图 2。

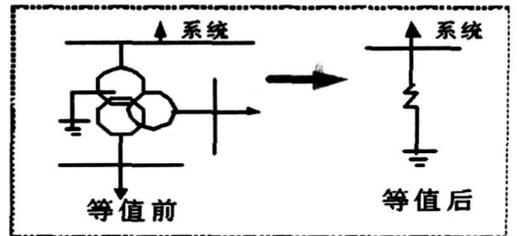


图 2 电源等值示意图

3 新疆电网网络等值

在对相关问题进行了研究和讨论分析后,对新疆

电网原电网中 110 kV 以下系统进行等值, 其中简化如下。

- 1) 将接在 35 kV 及以下总容量在 15 MW 以下的电厂进行等效, 采用上述四种电源峰值方法峰值;
- 2) 将 110 kV 变电站的主变压器、中低压负荷进行了等值, 负荷挂在 110 kV 侧, 去掉原主变压器支路, 变电站低压电容、电抗器进行了等值;
- 3) 保持原 110 kV 变电站主变压器中性点接地方式不变, 增设中性点接地支路 (设置了该支路正序阻抗、零序阻抗);
- 4) 负荷模型不变, 40% 恒阻抗 + 60% 电动机模型, 调整了电动机定子电抗。

等值前后, 新疆电网规模如表 1 所示。

表 1 等值前后新疆电网规模

	等值前	等值后	减小百分比 / %
母线	4 287	2 770	35. 4
发电机	235	225	4. 3
负荷点	1 961	1 453	25. 9
交流线 (含接地支路)	2 646	2 480	6. 3
两绕组变压器	307	213	30. 6
三绕组变压器	651	171	73. 7

4 等值前后暂态稳定计算结果对比

通过对比多条线路发生单相瞬时、三相永久故障 (计算采用 PSASP), 系统等值前后曲线。发现各种故障后, PSASP 仿真得到的曲线都有一定偏差。以下 3 图列出 3 条典型曲线 (吐鲁番-金沙发生三相永久性故障时的功角曲线和线路有功功率和无功功率曲线)。

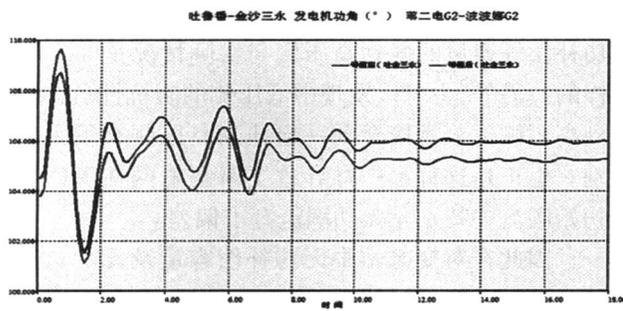


图 3 吐鲁番-金沙三相永久性故障发电机功角摆动

对比所有故障下等值前后曲线 (发电机功角、母线电压、线路有功、线路无功), 可以发现故障开始时, 图中等值前后两条曲线就有一定的偏差, 并且在该故障发生后基本保持不变; 另外对比线路传输的有功曲线和无功曲线, 可以发现各种故障时等值前后有

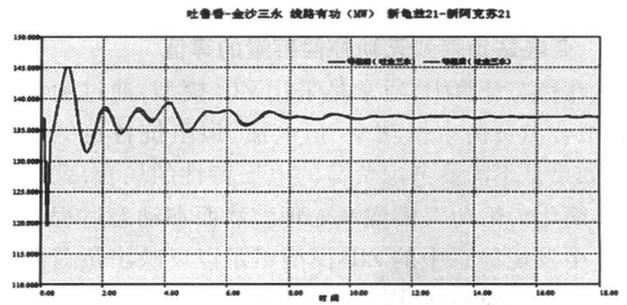


图 4 吐鲁番-金沙三相永久性故障线路有功摆动

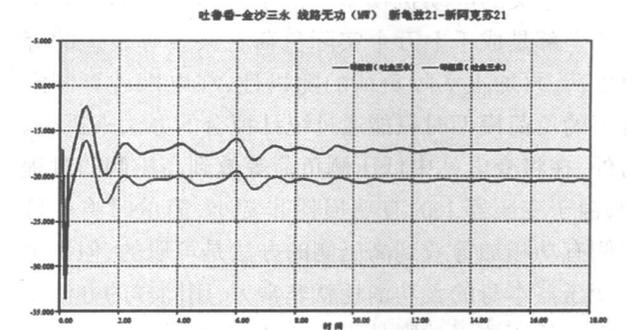


图 5 吐鲁番-金沙三相永久性故障线路无功摆动

功潮流上的误差都比无功潮流上的误差小得多。说明等值后系统还是能非常好的描述整个系统的动态过程, 但是等值造成了初始潮流有了偏差, 并且这种偏差主要是由于等值的无功传输功率有偏差造成。

5 对于等值中各项简化的分析

5.1 电源 (小机) 的等值

针对新疆电网小电源较多的情况, 在等值过程中分别针对新疆电网小电源的情况、特性, 细化四种等值方法, 充分考虑了小电源在电网中的作用和特性, 如果等值中涉及的机组容量很小, 该区域电网整体或大部分成下网趋势, 考虑与负荷等值抵消为负荷, 如果等值中涉及的机组容量很小, 但相对与负荷较大。该区域电网整体或大部分成上网趋势, 为考虑发电机组的动态特性, 考虑与负荷等值抵消为发电机, 并对发电机进行等值处理。如果等值中涉及的机组容量与负荷均变化, 该区域电网上下网趋势均存在。考虑发电机与负荷并存。基于上述 3 种对小电源的等值, 获得较好效果, 这一点在仿真结果中得到了很好的验证。

此外由于新疆电网接入西北 750 kV 主网后, 小机所在系统在电网中所贡献的作用已大大减小, 其在电网中的调节能力有限, 因此在潮流中忽略或弱化小机的调压能力, 同时等值带来的误差在可以接受的范

围。

5.2 变电站负荷和无功补偿容量的等值

在稳态计算中,通常是采用 ZIP 模型,通过测量值,拟合出负荷中恒功率、恒电流、恒阻抗各自的比例,如果是不需要考虑负荷的电压特性的场合,就进一步简化为恒功率模型来处理。然而在动态过程的仿真中发现稳态中的 ZIP 模型不足以反映出负荷的动态电压响应特性,因此在动态仿真中又引入了更具有实际意义的电动机模型。由于针对主网的计算中负荷全部是成千上万个实际负荷在某条母线上的等效负荷,再加上实际负荷的随机性,在电网计算制定合理的负荷模型时只能通过统计拟合的办法来进行。另外,在将变电站中低压侧负荷等效到高压侧的过程中,由于变压器上的有功损耗非常小,简单时将中低压侧有功相加等效到高压侧的办法是可取的,但是由于变压器本身的无功消耗就非常大,用同样的办法来处理中低压侧无功则是不行的,需要对其认真分析和考虑。

通过仿真计算结果发现,特别是等值之后的网络无功分布较等值前有较大的误差,而引起这种变化的原因之一就是变电站无功补偿容量、无功负荷的等值,故需要对变电站无功负荷、无功补偿容量进行研究分析,以下对变电站无功补偿以及负荷等值进行分析说明。

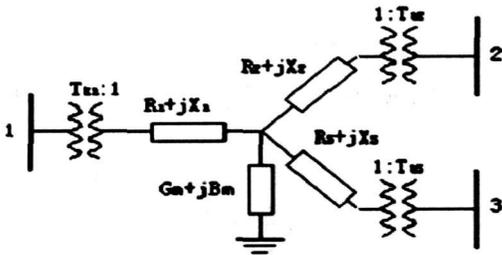


图 6 三绕组变压器等值电路图

对于上图所示三绕组变压器 (PSASP 中采用变压器模型,取中性点为标准变比侧,变压器对地支路接在中性点上),假设导纳为 b 的补偿电容接在变压器低压侧,中低压侧纯阻抗性质负荷分别为 y_{12} 和 y_{13} ,于是该变压器有如下方程。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 / T_{k1}^2 & & & y_1 / T_{k1} \\ & y_2 / T_{k2}^2 + y_{12} & & y_2 / T_{k2} \\ & & b + y_3 / T_{k3}^2 + y_{13} & y_3 / T_{k3} \\ y_1 / T_{k1} & y_2 / T_{k2} & y_3 / T_{k3} & y_1 + y_2 + y_3 + y_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $y_1 = \frac{1}{I_1 + j \cdot X_1}$, $y_2 = \frac{1}{I_2 + j \cdot X_2}$, $y_3 = \frac{1}{I_3 + j \cdot X_3}$,

$y_m = \frac{1}{G_m + j \cdot B_m}$ 。采用 WARD 等值对其进行化简,只保留高压侧母线。

$$I_1 = \left\{ \frac{\frac{y_1}{T_{k1}^2} \cdot \text{abs}\left(\frac{y_1}{T_{k1}^2}\right) \cdot (y_2 + y_{12} \cdot T_{k2}^2) \cdot (y_3 + T_{k3}^2 \cdot (b + y_{13}))}{K_1} \right\} \cdot U_1 + \begin{bmatrix} \frac{y_1 \cdot y_2 \cdot T_{k2} \cdot (y_3 + T_{k3}^2 \cdot (b + y_{13}))}{T_{k1} \cdot K_1} \\ \frac{y_1 \cdot y_3 \cdot T_{k3} \cdot (y_2 + y_{12} \cdot T_{k2}^2)}{T_{k1} \cdot K_1} \\ \frac{y_1 \cdot (y_2 + y_{12} \cdot T_{k2}^2) \cdot (y_3 + T_{k3}^2 \cdot (b + y_{13}))}{T_{k1} \cdot K_1} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} E \\ B \\ N \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,

$$K_1 = y_3 \cdot ((y_1 + y_m) \cdot (y_2 + y_{12} \cdot T_{k2}^2) + y_2 \cdot y_{12} \cdot T_{k2}^2) + y((y_1 + y_3 + y_m) \cdot y_2 + y_{12} \cdot T_{k2}^2 \cdot (y_1 + y_2 + y_3 + y_m)) \cdot T_{k3}^2 \cdot (b + y_{13}) \quad (3)$$

进一步的,如果假设这时中低压侧所带负荷全部是阻抗型负荷,即这时需要等值的网络是一个无源网络,这时可以去掉上式中后面与各侧注入电流相关的一项,并且忽略变压器激磁支路(在实际的 PSASP 计算中也未考虑激磁支路),于是上式可以化为

$$I_1 = (y_{eq1} - y_{eq2}(b)) \cdot U_1 \quad (4)$$

其中, y_{eq1} 为与低压侧补偿容量无关的部分,为常量; $y_{eq2}(b)$ 为受低压侧补偿容量影响的部分。

$$y_{eq2}(b) = \frac{\text{abs}\left(\frac{y_1}{T_{k1}^2}\right) \cdot (y_2 + y_{12} \cdot T_{k2}^2)^2 \cdot y_3^2}{(y_1 + y_3) \cdot y_2 + y_{12} \cdot T_{k2}^2 \cdot (y_1 + y_2 + y_3)} \cdot \frac{1}{K_1} \quad (5)$$

如果采用通常的直接将低压侧无功补偿等容量搬到高压侧,这时对应方程为,

$$I_1 = (y_{const} + b) \cdot U_1 \quad (6)$$

通过对比以上两式可知,显然简单的将低压侧无功补偿等容量的搬到高压侧与实际情况是非常不一样的。另外,也可以发现中低压侧的阻抗性负荷等值到高压侧也与直接合到一起挂到高压侧有很大的区别。也正是这种不一样导致了新疆电网在等值后的初始潮流中特别是无功潮流有了偏差。

因此在对变电站中无功补偿容量及无功负荷等值时,需要进行很好的处理以减少误差,最好严格的按照 WARD 或改进 WARD 等值法来进行,或者将其中之一进行量化等值,而另一种进行跟随修正等值。

本次新疆电网无功补偿容量、无功负荷等值时,为保证电网计算特性不变、最大限度的减少误差带来的影响,采用量化 + 跟随修正等值,由于采取负荷中的无功功率采取量化、无功补偿容量跟随修正量化等

值与无功补偿容量采取量化、负荷重的无功功率跟随修正量化等值不同,产生的误差也不相同,需要优化考虑,考虑到实际电网中无功补偿容量是已知部分,故采用先将无功补偿容量进行量化等值之后,在进行负荷的无功功率负荷进行跟随修正等值,方法简单可行,同时误差较小。采用此种方法等值之后,潮流计算及稳定计算的误差大大减少。

6 结 论

综述了网络等值方法,并将其应用到实际的系统中,针对新疆电网的实际情况,进一步优化了工程等值方法,并在应用中对对比了等值前后的计算结果,并对误差进行了分析,并提出以下结论和建议。

1)进行电网稳定计算分析前,对电网进行等值时,应事先分析,综合考虑等值部分的情况,而采用不同的等值方法,以满足工程要求,不能一概而论,应将动态等值、静态等值综合考虑,将同调等值法和模态等值法,估计等值法有效结合,以不偏离电网动态等值为要求,必要时可不简化等值,但要试研究目的进行综合分析,避免局部特性过大或者过小。

2)在对系统电源进行等值时,需对要等值的小电源进行分类、研究、分析、细化等值方案,分类等值。

3)等值后系统还是能非常好的描述整个系统的动态过程,但是等值造成了初始潮流有了偏差,并且这种偏差主要是由于对无功的等值误差造成的。

4)对于负荷无功功率等值、低压无功补偿设备的等值需要认真分析,认真考虑,双变量的动态等值,不但关系到静态潮流、同时也关系到负荷的动态特

性。

5)对中性点接地变电站的等值需考虑零序回路的等值,以减少稳定计算时不对称故障的稳定特性的误差。

参考文献

- [1] Tinney W F, Powell W L. The REI Approach to Power Network Equivalents. Proc of PICA Conference. 1977.
- [2] 张伯明,陈寿孙,严正. 高等电力网络分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
- [3] 李健,李栋. 静态等值方法的综合分析与评价 [M]. 电气应用, 2006, 25(9): 97-101.
- [4] 吴际舜. 电力系统安全分析 [M]. 上海:上海交通大学出版社, 1985.
- [5] 刘绪斌,王良,闫有朋. 电力系统静态等值改进算法的研究 [J]. 华北电力计算, 2010(3): 1-5.
- [6] 张海波,张伯明,王俏文,等. 不同外网等值模型对 EMS 应用效果的试验研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(3): 1-6.
- [7] 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, 2008.
- [8] MA J, VALLE R J. Identification of Dynamic Equivalents Preserving the Internal Modes Ramirez. IEEE Power Tech Conference Proceedings. BER IN; Bologna. 2003: 415-419.

作者简介:

常喜强 (1976),男,高级工程师,研究方向:电网稳定与控制;

周悦 (1985),男,硕士研究生,研究方向:电网电压稳定和电网规划。

(收稿日期: 2010-06-08)

(上接第 18 页)

参考文献

- [1] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 2007.
- [2] 魏明果. 实用小波分析 [M]. 北京:北京理工大学出版社, 2005.
- [3] Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets [M]. Philadelphia: Philadelphia City Press. 1992.
- [4] 潘泉. 小波滤波方法及应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [5] 谭剑,黄震,等. 基于小波变换的同杆并架双回路双端行波故障测距 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 51-55.

- [6] 舒乃秋,胡芳,周静. 基于小波变换的含噪声行波信号奇异点检测 [J]. 电网技术, 2004, 10(28): 59-62.
- [7] 吕艳萍,陈允平,刘珠明. 基于小波分析的超高压输电线路故障定位的研究 [J]. 中国电力, 2003, 36(2): 32-36.
- [8] 吴军基,吴秋伟. 电力系统故障时刻提取的小波分析 [J]. 继电器, 2000, 28(12): 1-3.
- [9] 覃剑,陈祥训. 基于小波变换技术的新型输电线路故障测距系统 [J]. 电网技术, 2003, 5(20): 45-47.
- [10] 王先明,陶时伟,陶冶,蔡德礼. 小波变换奇异性在电力系统行波故障测距中的应用 [J]. 贵州工业大学学报, 2001, 3(30): 50-85.

(收稿日期: 2010-05-31)