

DOI: 10.7667/PSPC171792

基于潮流及短路计算的电力系统 Ward 等值实现方法

许海^{1,2}, 杨尚瑾^{1,2}, 金雪芬^{1,2}, 汪扬^{1,2}

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 中电普瑞科技有限公司, 北京 102200)

摘要: 对电力系统进行电磁暂态计算, 需搭建原系统的等值模型。在电力市场环境下, 由于商业机密, 相关从业人员可能不具有电力系统外部网络信息, 或不具备对大型电力系统进行等值的软件模块, 这给工程计算带来了困难。针对这一问题, 提出一种基于潮流和短路计算的电力系统 Ward 等值实现方法。首先将内部网络流向边界节点的电流作为边界节点的等效注入电流, 进而对边界节点进行短路电流计算, 获得相应的短路电流和节点电压, 最后通过节点电压方程求解等值系统参数。理论和实际系统算例分析表明, 该方法具有极高的准确性。

关键词: 系统等值; 潮流计算; 短路计算; 节点电压; 节点导纳矩阵

A method to implement Ward equivalent based on power flow calculation and short circuit calculation

XU Hai^{1,2}, YANG Shangjin^{1,2}, JIN Xuefen^{1,2}, WANG Yang^{1,2}

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;
2. China EPRI Science & Technology Co., Ltd, Beijing 102200, China)

Abstract: To perform electromagnetic transient calculation on power systems, the equivalent simplification of original system should be carried out. In the electricity market environment, due to trade secrets, the relevant practitioners may not have external network information, or do not have software modules for equivalent simplification of large-scale power system, which brings difficulties to engineering calculation. A method to implement Ward equivalent based on power flow calculation and short circuit calculation is proposed. First, the currents from internal network to boundary nodes are treated as equivalent injection currents of boundary nodes. Then the node voltages and short-circuit currents are obtained by short-circuit current calculation of the boundary nodes of original system. Finally, the equivalent system parameters are calculated by node voltage equation. Theoretical analyses and results of an actual system simulation show that this method has high accuracy.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52466F150007).

Key words: power system equivalence; power flow calculation; short-circuit calculation; node voltage; node admittance matrix

0 引言

在进行电力系统继电保护计算或对某些电力设备进行保护定值计算时, 需对系统进行电磁暂态分析。随着电力系统的发展, 电网规模不断扩大, 大型网络可能包含数千个节点, 若搭建整个系统的电磁暂态模型, 其工作量将十分巨大, 而且所用的计算时间和计算机空间也是无法接受的。因此, 在进行此类分析计算时, 需将系统其他部分进行等值简

化, 仅保留与相关电力设备联系紧密的部分网络, 以简化建模和计算过程^[1-8]。

一般来说, 对一个互联系统进行等值, 需将其分为内部网络、边界节点和外部网络三部分, 其中, 前两者需要保留。对外部网络进行等值, 要保证当内部网络和边界节点发生变化, 如发生短路故障时, 等值系统的计算结果与等值前系统接近, 以满足理论分析或工程需求。目前, 根据系统等值的目和和应用场合的不同, 可将等值方法分为静态等值和动态等值。对电力设备进行保护定值计算, 需建立系统的静态等值模型, 方法包括 Ward 和 REI 等值等, 其中前者较为常用^[9-20]。在电力市场环境下, 由于

基金项目: 国家电网公司科技项目“超、特高压串联补偿装置状态监测技术的研究及应用”(52466F150007)

商业机密, 相关从业人员可能不具有电力系统外部网络信息, 或不具备对大型电力系统进行等值计算的软件模块, 给工程计算带来困难。

为解决上述问题, 文献[11]提出一种基于电力系统分析综合程序(Power System Analysis Software Package, PSASP)短路计算的电网等值方法, 首先去除内部网络节点和支路, 通过全部边界节点的同时短路获得注入电流源, 然后边界节点逐一短路, 得到节点电压方程组, 求解出节点导纳矩阵。经过大型区域电网仿真分析验证了方法的可行性, 但该方法需修改原系统结构, 算例结果显示存在一定误差。

为提高结果的准确性, 本文提出了一种基于潮流和短路计算的 Ward 等值实现方法。保持原系统结构, 将内部网络流向边界节点的电流等效为边界节点的注入电流, 之后对边界节点进行短路计算, 获得节点电压和短路电流, 以此进行等值参数的计算。通过实际系统验证了等值方法的可行性和准确性, 并与原有方法进行了对比分析。

1 Ward 等值法

Ward 等值法是针对工频的等值方法^[12]。将整个系统分为内部网络、边界节点和外部网络, 如图 1 所示, 三个子系统的节点集合分别用 I、B 和 E 表示。

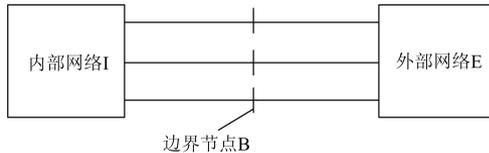


Fig. 1 Power system before equivalence

用分块矩阵的形式列写全系统网络方程, 如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} Y_{EE} & Y_{EB} \\ Y_{BE} & Y_{BB} & Y_{BI} \\ & Y_{IB} & Y_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_E \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_E \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_I \end{bmatrix} \quad (1)$$

采用高斯消去法消去外部网络节点, 即消去电压变量 \dot{U}_E , 得

$$\begin{bmatrix} \tilde{Y}_{BB} & Y_{BI} \\ Y_{IB} & Y_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_B \\ \dot{U}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{I}_B \\ \dot{I}_I \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\tilde{Y}_{BB} = Y_{BB} - Y_{BE} Y_{EE}^{-1} Y_{EB}$; $\tilde{I}_B = \dot{I}_B - Y_{BE} Y_{EE}^{-1} \dot{I}_E$ 。

式(2)代表的等值系统如图 2 所示。

可以看到, 消去部分的系统简化为边界节点的对地导纳及边界节点间的等值支路导纳, 消去部分的注入电流则由边界节点的注入电流等效。

实际电网中, 节点注入一般用功率表示, 有

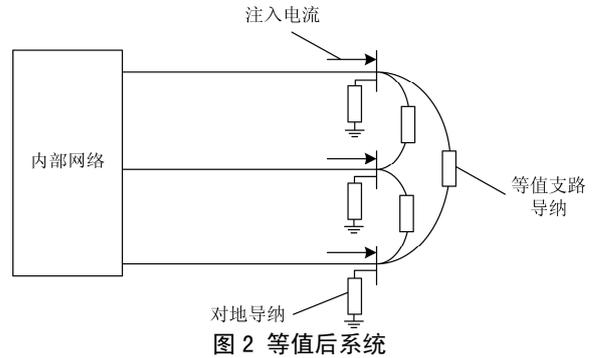


Fig. 2 Power system after equivalence

$$\dot{I}_i = \left(\frac{\dot{S}_i}{\dot{U}_i} \right)^* \quad (3)$$

式中: \dot{S}_i 为节点 i 的注入复功率; \dot{U}_i 为节点 i 的电压。

因此, 式(2)可变为

$$\begin{bmatrix} \tilde{Y}_{BB} & Y_{BI} \\ Y_{IB} & Y_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_B \\ \dot{U}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\dot{S}_B}{\dot{V}_B} \right)^* - Y_{BE} Y_{EE}^{-1} \left(\frac{\dot{S}_E}{\dot{V}_E} \right)^* \\ \left(\frac{\dot{S}_I}{\dot{V}_I} \right)^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

从式(2)可以看到, 对于线性系统, 这是一种严格的等值方法, 可以保证内部网络及边界节点各种短路电流计算的准确性^[17]。因此, 采用 Ward 等值建立等值系统, 保证保留部分的短路电流与原系统一致, 可以用来进行与电力设备及继电保护相关的电磁暂态计算。

但从式(4)可以看到, 若将注入电流改用注入复功率表示, 则等值后的网络方程将变为非线性方程, 等值后得到的式(4)与系统的初始运行点有关, 当系统运行点发生变化, 即使外部系统的节点注入功率不变, 节点注入电流也会发生变化。

Ward 等值需要专门的软件计算模块, 且要对全网的节点导纳矩阵进行高斯消去, 计算量较大。

由于等值前后系统短路电流及潮流一致, 因此, 通过原系统的短路电流和稳态潮流, 可对等值系统参数进行求解。

2 基于潮流及短路计算的电力系统 Ward 等值实现方法

由图 2 可以看到, 对原系统进行等值, 就是对边界节点的对地导纳、等值支路导纳和注入电流进行求解。因此, 可将边界节点作为一个整体考虑, 求解由边界节点组成网络的节点导纳矩阵, 即可得到等值系统参数。内部网络不应影响等值系统参数, 如何处理等值参数求解过程中内部网络和

边界节点的关系是确定等值方法的关键。

文献[11]对内部网络和边界节点间的线路进行了断线处理, 求解边界母线导纳矩阵较为方便, 但这会改变系统结构, 影响等值计算结果的准确性。这里采用新的处理方法, 保留内部网络和边界节点间的线路, 将内部网络流向边界节点的电流看作边界节点的注入电流, 这样就可以在不改变系统结构的基础上进行等值计算。

以包含 3 个边界节点的网络为例进行说明。图 3 为其等值后的形式, 其中, y_{10} 、 y_{20} 和 y_{30} 为边界节点对地导纳, y_{12} 、 y_{13} 和 y_{23} 为等值支路导纳, \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 和 \dot{I}_3 为等效注入电流, \dot{I}_{11} 、 \dot{I}_{12} 、 \dot{I}_{13} 为内部网络流向各个边界节点的电流。

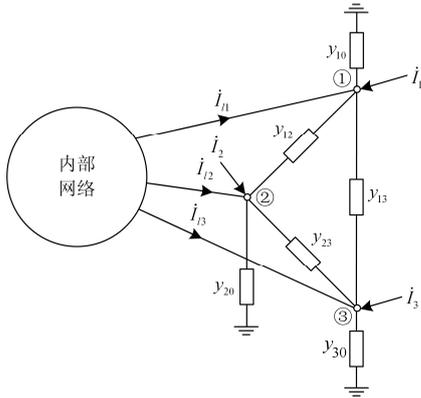


图 3 包含 3 个边界节点的等值系统

Fig. 3 Equivalent system containing 3 boundary nodes

等值方法流程如下:

对由边界母线组成的网络, 列写短路前的节点电压方程, 有

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 + \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_2 + \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_3 + \dot{I}_{13} \end{bmatrix} \quad (5)$$

节点 1 发生短路故障后, 有

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1^{(1)} \\ \dot{U}_2^{(1)} \\ \dot{U}_3^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 + \dot{I}_{11}^{(1)} - \dot{I}_{f1} \\ \dot{I}_2 + \dot{I}_{12}^{(1)} \\ \dot{I}_3 + \dot{I}_{13}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\dot{U}_1^{(1)}$ 、 $\dot{U}_2^{(1)}$ 和 $\dot{U}_3^{(1)}$ 为节点 1 短路后的边界节点电压; $\dot{I}_{11}^{(1)}$ 、 $\dot{I}_{12}^{(1)}$ 和 $\dot{I}_{13}^{(1)}$ 为节点 1 短路后由内部网络流向边界节点的电流; \dot{I}_{f1} 为节点 1 短路电流。

式(6)减式(5), 有

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1^{(1)} - \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2^{(1)} - \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3^{(1)} - \dot{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{11}^{(1)} - \dot{I}_{11} - \dot{I}_{f1} \\ \dot{I}_{12}^{(1)} - \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_{13}^{(1)} - \dot{I}_{13} \end{bmatrix} \quad (7)$$

同样, 2、3 点短路, 可列写方程

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1^{(2)} - \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2^{(2)} - \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3^{(2)} - \dot{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{11}^{(2)} - \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{12}^{(2)} - \dot{I}_{12} - \dot{I}_{f2} \\ \dot{I}_{13}^{(2)} - \dot{I}_{13} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1^{(3)} - \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2^{(3)} - \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3^{(3)} - \dot{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{11}^{(3)} - \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{12}^{(3)} - \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_{13}^{(3)} - \dot{I}_{13} - \dot{I}_{f3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

综合 3 个边界节点的方程, 可得

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1^{(1)} - \dot{U}_1 & \dot{U}_1^{(2)} - \dot{U}_1 & \dot{U}_1^{(3)} - \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2^{(1)} - \dot{U}_2 & \dot{U}_2^{(2)} - \dot{U}_2 & \dot{U}_2^{(3)} - \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3^{(1)} - \dot{U}_3 & \dot{U}_3^{(2)} - \dot{U}_3 & \dot{U}_3^{(3)} - \dot{U}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{11}^{(1)} - \dot{I}_{11} - \dot{I}_{f1} & \dot{I}_{11}^{(2)} - \dot{I}_{11} & \dot{I}_{11}^{(3)} - \dot{I}_{11} \\ \dot{I}_{12}^{(1)} - \dot{I}_{12} & \dot{I}_{12}^{(2)} - \dot{I}_{12} - \dot{I}_{f2} & \dot{I}_{12}^{(3)} - \dot{I}_{12} \\ \dot{I}_{13}^{(1)} - \dot{I}_{13} & \dot{I}_{13}^{(2)} - \dot{I}_{13} & \dot{I}_{13}^{(3)} - \dot{I}_{13} - \dot{I}_{f3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(10)中, 电压矩阵和电流矩阵都是已知的, 可对节点导纳矩阵进行求解。

最后通过式(5), 求解注入电流。

等值网络分为正序、负序和零序网络, 若对正序和零序等值网络求解, 节点电压方程中的电压和电流需分别采用正序和零序分量; 负序网络可认为与正序网络相同。

以上方法获得的是电力系统 Ward 等值模型, 可用于对系统进行电磁暂态分析, 如电力系统继电保护计算或某些电力设备保护定值计算。在等值模型搭建时, 需考虑近期、远期和大方式、小方式等多种系统情况, 以使计算结果具备普遍适用性。当未来系统结构发生重大变化时, 则需重新搭建等值模型, 防止计算数据与实际系统不符。

与通过矩阵高斯消去法获得 Ward 等值模型相同, 基于潮流及短路计算的电力系统 Ward 等值实现方法, 也需要依据全网数据, 但由于其利用的是系统潮流及短路结果, 因此与前者相比, 其适用于以下两种场合: (1) 从业人员无法获得全网模型, 仅能获得潮流及短路数据的情况; (2) 从业人员能够获得全网仿真模型, 但不具备进行等值计算的软件模块。这为 Ward 等值的工程应用提供了很大便利。

与文献[11]相比, 基于潮流和短路计算的 Ward 等值实现方法避免了修改原系统结构, 且无需对多个节点同时短路, 除了简化了处理方式, 还可提高等值参数计算的准确性, 这将通过具体算例进行分析。

3 节点电压方程简化求解方法

如式(10)所示, 等值方法最后需要通过求解节点电压方程计算等值系统的节点导纳矩阵。节点电压矩阵和注入电流矩阵都是已知的, 因此, 可以通过对节点电压矩阵求逆的方法进行求解。

在节点导纳矩阵中, $Y_{ij} = Y_{ji}$, 对保留 n 个边界节点的等值系统, 节点导纳矩阵中的未知量只有 $(n^2+n)/2$ 个, 因此, 无需对矩阵进行求逆运算, 采用列写线性方程组的方式即可^[21], 以减少电流矩阵元素的保留数量。

在选择保留的电流元素时, 为保证能够解出节点导纳矩阵, 要求列写的线性方程组具有唯一解。某些情况下, 方程组可能得不到唯一解, 如在式(10)中, 若省略电流矩阵的某一行元素, 则无法求解出节点导纳矩阵对应行的自导纳, 不满足要求。针对这一问题, 提供一种线性方程列写方法, 同样以保留 3 个边界节点的系统为例进行说明。

为简便起见, 采用式(11)所示的方程代表式(10)。

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{11} & \dot{U}_{12} & \dot{U}_{13} \\ \dot{U}_{21} & \dot{U}_{22} & \dot{U}_{23} \\ \dot{U}_{31} & \dot{U}_{32} & \dot{U}_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{11} & \dot{I}_{12} & \dot{I}_{13} \\ \dot{I}_{21} & \dot{I}_{22} & \dot{I}_{23} \\ \dot{I}_{31} & \dot{I}_{32} & \dot{I}_{33} \end{bmatrix} \quad (11)$$

首先, 对电流矩阵的第一行元素列写方程, 有

$$\begin{cases} \dot{U}_{11}Y_{11} + \dot{U}_{21}Y_{12} + \dot{U}_{31}Y_{13} = \dot{I}_{11} \\ \dot{U}_{12}Y_{11} + \dot{U}_{22}Y_{12} + \dot{U}_{32}Y_{13} = \dot{I}_{12} \\ \dot{U}_{13}Y_{11} + \dot{U}_{23}Y_{12} + \dot{U}_{33}Y_{13} = \dot{I}_{13} \end{cases} \quad (12)$$

上式的物理意义为由节点 1 的自导纳和互导纳以及 3 个边界节点的电压可以唯一确定节点 1 的注入电流, 因此, 可以得到节点导纳矩阵第一行的元素。

接下来进行节点导纳矩阵第二行的求解。由于 $Y_{21} = Y_{12}$, 因此, 对第二行元素只需列写两个方程, 如式(13)所示。

$$\begin{cases} \dot{U}_{21}Y_{22} + \dot{U}_{31}Y_{23} = \dot{I}_{21} - \dot{U}_{11}Y_{21} \\ \dot{U}_{23}Y_{22} + \dot{U}_{33}Y_{23} = \dot{I}_{23} - \dot{U}_{13}Y_{21} \end{cases} \quad (13)$$

由式(10)可以看到, 节点注入电流矩阵中对角元素数据量较大, 因此, 上式是针对 \dot{I}_{21} 和 \dot{I}_{23} 列写的方程, 可计算得到 Y_{22} 和 Y_{23} 。

最后求解节点导纳矩阵第三行的元素, 列写如式(14)所示的方程。

$$\dot{U}_{31}Y_{33} = \dot{I}_{31} - \dot{U}_{11}Y_{31} - \dot{U}_{21}Y_{32} \quad (14)$$

同样为了避免用到对角元素, 方程针对 \dot{I}_{31} 或 \dot{I}_{32} 列写。

为了使各方程的物理意义更加明确, 上述求解过程是分步进行的, 在实际应用时可直接列写式(12)一式(14)所示的 6 个方程并求解。

采用上述求解非齐次线性方程的方法可保证得到节点导纳矩阵的唯一解, 该方法可扩展到具有 $n(n \geq 2)$ 个边界节点的等值系统参数的求解。

与求解节点电压矩阵的逆矩阵相比, 电流矩阵中有 $(n^2-n)/2$ 个元素无需参与计算, 相应的有 $n-1$ 个短路电流及 $(n^2-n)/2$ 个短路后由内部网络流向边界节点的电流无需记录。

4 算例分析

4.1 算例系统

为检验基于潮流和短路计算的 Ward 等值实现方法的准确性, 采用实际系统进行算例验证。如图 4 所示, BS 站配置了 3 套 500 kV 固定串联电容补偿装置。其中 2 套位于 LP 到 BS 的传输线上, 另外 1 套位于 MW 到 BS 的传输线上。现在要对固定串补装置进行基本参数设计及过电压保护方案研究^[22-23], 根据研究的系统情况和电磁暂态计算的要求, 需要保留串补装置所在线路相邻母线, 因此, 选择 LP、MW 和 BS 三条 500 kV 母线为边界母线, 对电网进行等值简化。

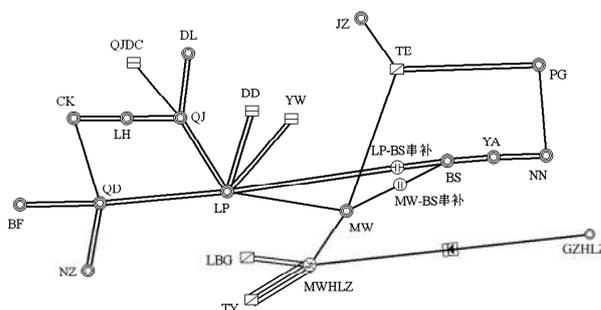


图 4 算例系统地理接线图

Fig. 4 Geographical wiring diagram of example system

4.2 等值系统参数计算

采用文献[11]等值方法(方法一)和本文提出的方法(方法二)进行等值, 等值后的系统如图 5 所示, 等值参数分别如表 1 和表 2 所示。为了电磁暂态软件中建模的方便, 这里的等值机采用电压源与阻抗串联的型式, 忽略阻抗值较小的等值支路。

MW-BS 等值支路正序阻抗为 $44.06+360.06\Omega$, 其他等值支路阻抗数值很大, 可忽略。

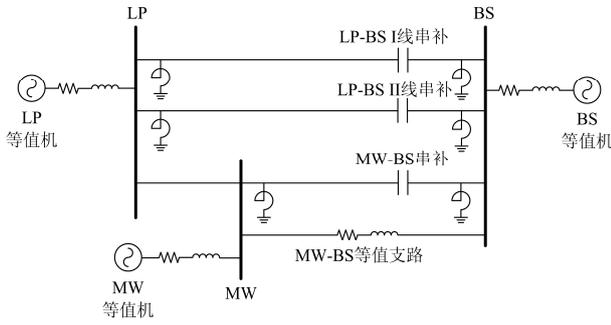


图5 等值系统接线图

Fig. 5 Wiring diagram of equivalent system

表1 方法一等值机参数

Table 1 Equivalent machine parameters of method 1

节点	电压源		阻抗	
	幅值/kV	相位/(°)	正序/ Ω	零序/ Ω
LP	538.07	41.95	1.10+j11.57	1.84+j13.15
MW	548.58	4.80	1.72+j20.17	2.20+j25.59
BS	500.50	0.15	3.91+j31.47	2.90+j32.88

表2 方法二等值机参数

Table 2 Equivalent machine parameters of method 2

节点	电压源		阻抗	
	幅值/kV	相位/(°)	正序/ Ω	零序/ Ω
LP	542.25	11.96	1.09+j11.58	1.83+j13.11
MW	548.99	4.94	1.69+j20.14	2.17+j25.69
BS	505.89	-2.99	3.80+j31.47	2.84+j33.00

MW-B I线串补支路正序阻抗为 $15.22+j416.16 \Omega$ ，其他等值支路阻抗数值很大，可忽略。

4.3 等值结果校验及分析

根据系统等值的要求，这里对等值前后系统短路电流和稳态潮流进行对比。

选择短路点为LP、MW和BS 500 kV母线以及LP-B I线串补和MW-B I线串补的线路侧，对等值前后系统三相和单相短路电流大小进行对比，分别如表3和表4所示。LP-B I线串补装置参数完全一致，这里仅给出了LP-B I线串补线路侧短路电流。

稳态时各节点电压可体现潮流情况，这里给出了等值前后各节点电压对比，如表5所示。

由表3和表4可以看到，与等值前系统相比，方法一等值后系统的三相短路电流相对误差最大为7.81%，单相短路电流相对误差最大为7.44%；方法二等值后系统的三相短路电流相对误差最大为0.09%，单相短路电流相对误差最大为0.37%。从表5可以看到，方法二稳态节点电压与原系统一致，

而方法一则存在误差，这说明方法二得到的等值系统稳态潮流具有更高的准确度。

表3 三相短路电流对比

Table 3 Comparison of 3-phase short circuit current

短路点	原系统短路电流/kA	方法一		方法二	
		短路电流/kA	相对误差/%	短路电流/kA	相对误差/%
LP	40.54	38.42	-5.23	40.53	-0.02
MW	29.29	27.80	-5.09	29.27	-0.07
BS	26.57	24.98	-5.98	26.59	0.08
LP-B I线串补线路侧	11.40	11.10	-2.63	11.39	-0.09
MW-B I线串补线路侧	12.29	11.33	-7.81	12.29	0

表4 单相短路电流对比

Table 4 Comparison of single-phase short circuit current

短路点	原系统短路电流/kA	方法一		方法二	
		短路电流/kA	相对误差/%	短路电流/kA	相对误差/%
LP	35.39	33.55	-5.20	35.43	0.11
MW	23.27	22.10	-5.03	23.26	-0.04
BS	19.83	18.69	-5.75	19.90	0.35
LP-B I线串补线路侧	15.53	15.13	-2.58	15.52	-0.06
MW-B I线串补线路侧	16.39	15.17	-7.44	16.45	0.37

表5 稳态节点电压对比

Table 5 Comparison of steady state node voltage

	LP 电压		MW 电压		BS 电压	
	幅值/kA	相位/(°)	幅值/kA	相位/(°)	幅值/kA	相位/(°)
原系统	538.0	8.37	541.8	6.11	538.5	5.13
方法一等值系统	509.8	28.84	514.8	16.09	505.9	18.72
方法二等值系统	538.0	8.37	541.8	6.11	538.5	5.13

方法二的误差明显要小于前者，这是由Ward等值的特点决定的。由式(2)和式(4)可以看到，若系统运行点改变，则节点注入电流会发生变化，系统的短路电流也会发生相应变化，因此，对运行点改变后的系统建立Ward等值，其短路电流与变化后的系统一致。方法一断开了相关线路，改变了系统的初始运行点，而方法二未对原系统做修改，因此，两者存在准确性上的差异。

5 结论

本文提出了一种基于潮流和短路计算的 Ward 等值实现方法, 保证等值后系统的短路电流与原系统一致。通过实际算例分析, 证明与原有方法相比, 本文提出的等值方法有更高的准确性。同时提出了通过节点电压矩阵和注入电流矩阵计算等值系统节点电压方程的简化算法, 可减少所要记录的数据, 节省计算量。

参考文献

- [1] LI Chao, LI Bin, GUO Fengrui, et al. Studies of the active SISFCL and its impact on the distance protection of the EHV transmission line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 164-169. DOI: 10.1186/s41601-016-0028-7.
- [2] 徐玉琴, 刘丹丹. 基于两步分群法的双馈机组风电场等值建[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 108-114. XU Yuqin, LIU Dandan. Equivalence of wind farms with DFIG based on two-step clustering method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 108-114.
- [3] 李健, 李栋. 电网静态等值方法的综合分析与评价[J]. 电气应用, 2006, 25(9): 97-101, 146. LI Jian, LI Dong. Analysis and review of static network reduction approaches[J]. Electrotechnical Application, 2006, 25(9): 97-101, 146.
- [4] 刘多多. 电网静态等值及其效果评价方法的研究[D]. 济南: 山东大学, 2010. LIU Duoduo. Studies on static equivalent of power system and its evaluation method[D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [5] 吴海霞. 基于 PSS/E 的适用于电磁暂态仿真的动态等值方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [6] 徐政, 杨靖萍, 段慧. 一种适用于电磁暂态仿真的等值简约方法[J]. 南方电网技术, 2007, 1(1): 37-40. XU Zheng, YANG Jingping, DUAN Hui. An equivalent reduction method for electromagnetic transient simulation of large-scale power systems[J]. Southern Power System Technology, 2007, 1(1): 37-40.
- [7] 胡国文, 王仲鸿, 程明. 与伊一冯输电线路相连电网的等值简化与仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(9): 5-9. HU Guowen, WANG Zhonghong, CHENG Ming. Equivalent simplification and emulation research on power network connected to Yimin-Fengtun transmission line[J]. Power System Technology, 2005, 29(9): 5-9.
- [8] WU F F, MONTICELLI A. Critical review of external network modelling for online security analysis[J]. Electric Power and Energy Systems, 1983, 5(4): 222-235.
- [9] 楼霞薇, 王威, 王波. 基于 WARD 等值的电网限流运行方式优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 128-136. LOU Xiawei, WANG Wei, WANG Bo. A grid operation mode optimization method for controlling short-circuit current level based on WARD equivalence[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 128-136.
- [10] 殷自力, 陈宇星. 基于功率传输转移分布因子的简化电网潮流计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 25-30. YIN Zili, CHEN Yuxing. A power flow computation method for reduction grid based on power transfer distribution factor[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 25-30.
- [11] 文明浩, 杨帆. 基于 PSASP 短路计算的区域电网等值方法[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 113-117. WEN Minghao, YANG Fan. An equivalence method of regional power network based on short circuit calculation by power system analysis software package[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 113-117.
- [12] 林济铿, 闫贻鹏, 刘涛, 等. 电力系统电磁暂态仿真外部系统等值方法综述[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 108-115. LIN Jikeng, YAN Yipeng, LIU Tao, et al. Review on external system equivalent method for electromagnetic transient simulation of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 108-115.
- [13] 刘绪斌, 王良, 闫有朋. 电力系统静态等值改进算法的研究[J]. 华北电力技术, 2010, 30(3): 1-5. LIU Xubin, WANG Liang, YAN Youpeng. Studies on improved method of power system static equivalence[J]. North China Electric Power, 2010, 30(3): 1-5.
- [14] WARD J B. Equivalent circuits for power-flow studies[J]. Electrical Engineering, 1949, 68(9): 373-382.
- [15] 李小明, 卢建刚, 郭文鑫, 等. 基于内网常规 Ward 等值电路的外网静态等值法[J]. 电力与能源, 2013, 34(6): 575-579. LI Shiming, LU Jiangang, GUO Wenxin, et al. External network static equivalent on the basis of internal general ward equivalent circuit[J]. Power and Energy, 2013, 34(6): 575-579.
- [16] 李小明. 基于内网实测信息的两端互联电网静态等值参数估计方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011. LI Shiming. Research on parameter estimation method of

- two-port interconnected grid external network static equivalent parameter on the basis of internal network measured information[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [17] 吴际舜. 电力系统静态安全分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985.
- [18] 刘小波, 丁晓群, 龙启峰, 等. 基于 Ward 等值的二级电压控制研究[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 53-56.
LIU Xiaobo, DING Xiaqun, LONG Qifeng, et al. Study on secondary voltage control based on ward equivalent[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 53-56.
- [19] BALDWIN T L, MILI L, PHADKE A G. Dynamic ward equivalents for transient stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 59-67.
- [20] 颜伟, 李世明, 陈俊, 等. 基于内网实测信息的两端口外网静态等值参数估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 101-106.
YAN Wei, LI Shiming, CHEN Jun, et al. Parameter estimation for two-port external network static equivalent model on the basis of internal network measured information[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 101-106.
- [21] 居余马, 胡金德, 林翠琴, 等. 线性代数[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [22] 张媛媛, 班连庚, 项祖涛, 等. 1 000 kV 特高压固定串联补偿装置关键元件工作条件研究[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2218-2224.
ZHANG Yuanyuan, BAN Liangeng, XIANG Zutao, et al. Research on working condition of key components for fixed series compensation in 1 000 kV UHV AC power transmission project[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2218-2224.
- [23] 袁敬中. 大房 500 kV 串联补偿站控制与保护[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(11): 66-69.
YUAN Jingzhong. The control and protection system for defang 500 kV transmission line series compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(11): 66-69.

收稿日期: 2017-12-10; 修回日期: 2018-03-28

作者简介:

许海(1983—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为超特高压串联补偿装置及电力电子技术; E-mail: xuhai@sgepri.sgcc.com.cn

杨尚瑾(1987—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统分析与控制、灵活交流输电技术; E-mail: yangshangjin@sgepri.sgcc.com.cn

金雪芬(1984—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为灵活交流输电技术。E-mail: jinxuefen@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)