

针对大量接地支路电网形成节点阻抗矩阵的改进算法

杨美佳, 刘宝柱

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 在大型实际电力网络中, 为了能够有效处理支路间存在的互感和网络中大量的接地支路, 提出了利用过渡矩阵形成节点阻抗矩阵的算法。该算法以电路基本理论为基础, 分别形成了三个过渡矩阵: 节点电压对支路电压矩阵 M_{VU} 、节点电压对支路电流矩阵 M_{VI} 和支路电流对节点注入电流矩阵 M_{IJ} ; 并将接地支路等效为节点注入电流后修正相应的过渡矩阵, 形成扩展的节点电压对节点注入电流矩阵 M_{VJ0} ; 利用 kron 法对分块的 M_{VJ0} 进行消去运算, 进而得出节点阻抗矩阵 Z_M 。结合算例给出了算法的主体流程, 验证和比较分析了所提算法的有效性和高效性。该方法为利用节点阻抗矩阵开展下一步研究工作提供了一个新的分析工具。

关键词: 电力系统; 节点阻抗矩阵; 接地支路; 过渡矩阵; kron 消去法

An improved algorithm for forming Z-matrix of power grid containing large amount of grounded-branches

YANG Mei-jia, LIU Bao-zhu

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To process mutual inductance between transmission lines and large quantity of grounded-branches in power system efficiently, an improved algorithm using transitional matrix to form bus impedance matrix (Z-matrix) is presented. Based on basic theory of circuits, three transitional matrices are built, which are node voltage vs. branch voltage matrix M_{VU} , node voltage vs. branch current matrix M_{VI} and branch current vs. current injection matrix M_{IJ} . Corresponding transitional matrices are amended after grounded-branches are equivalent to bus current injection. Extended node voltage vs. current injection matrix M_{VJ0} is formed. Z-matrix is gained by using kron reduction method to calculate the blocked M_{VJ0} . The main process is presented and a lot of examples show that the improved algorithm is effective and universal. It will be a new analysis tool for further research by using Z-matrix.

Key words: power system; bus impedance matrix; grounded-branches; transitional matrix; kron reduction method

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0161-05

0 引言

形成节点阻抗矩阵是进行电力系统分析和控制研究的基础内容, 其在电力系统稳定分析、事故分析等场合有着重要的应用^[1-8]。一般而言, 形成节点阻抗矩阵的计算量要较形成相应节点导纳矩阵的计算量大, 但节点阻抗矩阵所蕴藏的信息量要远大于节点导纳矩阵^[9-10], 所以有必要进一步深入研究形成节点阻抗矩阵的算法。近年来, 随着电力系统规模的不断扩大及同杆并架多回线等运行方式的增加, 形成节点阻抗矩阵的传统算法^[9] (节点导纳矩阵求逆法和支路追加法) 在降低计算量及互感支路的处理^[11]等方面面临严峻的考验, 因此一些形成节点阻抗矩阵的新算法应运而生^[12-17]。有些算法在形成节点阻抗矩阵中采用了借助过渡矩阵的思想, 其

在计算过程中能够获得更多信息量, 能够较好地处理互感支路的影响, 但是在这些算法中, 针对大量接地支路的高效处理方法尚未得到充分重视。

由于电力线路、变压器通常作为 π 型等效电路处理^[18-19], 用以往形成节点阻抗矩阵的算法, 可将接地支路视为连支支路, 与非接地支路的连支支路计算角色一致, 但这样会造成网络中连支数大于树枝数的情况, 给后续的计算带来困难。对于节点数较多的大规模电力网络, 在利用 kron 法对矩阵作消去运算时会使计算量大为增加, 其计算的复杂程度与计算时间甚至超过直接利用节点导纳矩阵求逆的方法。基于此, 本文以含互感的电力网络为研究对象, 深入研究接地支路在形成节点阻抗矩阵中的高效处理方法, 首先形成三个过渡矩阵: 节点电压对支路电压矩阵 M_{VU} 、节点电压对支路电流矩阵 M_{VI}

和支路电流对节点注入电流矩阵 M_{IJ} ; 其次通过将接地支路进行等效, 以等值注入电流的形式对上述三个过渡矩阵进行改造, 形成扩展的节点电压对节点注入电流矩阵 M_{VJ0} ; 最后利用 kron 法对 M_{VJ0} 进行消去运算, 进而得出节点阻抗矩阵 Z_M 。

1 计算流程

设某电力网络有 m 条支路(等效对地支路除外)和 n 个节点(参考节点除外), 利用深度搜索法确定该网络的某一个树支集 TS 和连支集 LS , 之后对其节点和支路进行编号: 由参考节点开始, 树支集 TS 的支路和节点编号顺序均为 1 到 n , 按照第 i 条支路电流流向节点 i 的方向对树支和节点依次编号, 树支电流的参考正方向为由节点 i 流向节点 $i+1$; 连支集 LS 中连支支路的编号是任意的, 其编号顺序为 $n+1$ 到 m 。将第 i 条支路的电流记为 I_i , 支路电压记为 U_i , 支路自阻抗记为 Z_{ii} , 支路之间的互感阻抗记为 $Z_{ij} |_{i \neq j}$; 将第 i 个节点的节点电压记为 V_i , 节点注入电流记为 J_i 。

1.1 节点电压对支路电压矩阵 M_{VU} 的求解^[17]

求取节点电压与支路电压关系式:

$$\begin{bmatrix} V_{n \times 1} \\ \mathbf{0}_{(m-n) \times 1} \end{bmatrix} = -M_{VU} \begin{bmatrix} U_{TSn \times 1} \\ U_{LS(m-n) \times 1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

计算节点电压关系式及连支支路电压与树支支路电压的关系式, 将两式进行矩阵组合和变换, 可得到节点电压和支路电压矩阵关系式:

$$\begin{bmatrix} V_{n \times 1} \\ \mathbf{0}_{(m-n) \times 1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} A_{n \times n} & \mathbf{0}_{n \times (m-n)} \\ C_{(m-n) \times n} & E_{(m-n) \times (m-n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{TSn \times 1} \\ U_{LS(m-n) \times 1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)右侧的系数矩阵即为节点电压对支路电压矩阵 M_{VU} 。其中, 矩阵 A 为元素皆为 1 的下三角阵。

1.2 节点电压对支路电流矩阵 M_{VI} 的求解

由欧姆定律及式(1)可得节点电压与支路电流矩阵关系式:

$$\begin{bmatrix} V_{n \times 1} \\ \mathbf{0}_{(m-n) \times 1} \end{bmatrix} = -M_{VI} Z \begin{bmatrix} I_{TSn \times 1} \\ I_{LS(m-n) \times 1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, Z 为支路阻抗矩阵^[20]。则求解出节点电压对支路电流矩阵 $M_{VI} = M_{VU} Z$ 。

1.3 支路电流对节点注入电流矩阵 M_{IJ} 的求解

根据 KCL 定律, 若将连支电流视为节点注入电流, 则 i 节点的电流关系式可写为:

$$I_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n k_{ij} I_j = -(J_i + \sum_{l=n+1}^m m_{il} I_l) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

其中: k_{ij} 为树支 j 的电流与节点 i 之间的关系系数, 若 I_j 流入节点 i , 则 k_{ij} 取 1; 反之, 若 I_j 流出节点 i ,

则 k_{ij} 取 -1; 若 I_j 与节点 i 不关联, 则 k_{ij} 取 0。 m_{ij} 为连支 l 的电流与节点 i 之间的关系系数, 当 I_l 流入节点 i , 则 m_{ij} 取 1; 反之, m_{ij} 取 -1; 若 I_l 与节点 i 不关联, 则 m_{ij} 取 0。

式(4)的矩阵表达式可写为:

$$H_{n \times n} I_{TSn \times 1} = -(J_{n \times 1} + P_{n \times (m-n)} I_{LS(m-n) \times 1}) \quad (5)$$

其中: 矩阵 $H_{n \times n}$ 的第 i 行向量为 $[k_{i1} \ k_{i2} \ \dots \ 1_{ii} \ \dots \ k_{in}]$; 矩阵 $P_{n \times (m-n)}$ 的第 i 行向量为 $[m_{i,n+1} \ m_{i,n+2} \ \dots \ 1_{ii} \ \dots \ k_{im}]$ 。

对矩阵 $H_{n \times n}$ 求逆, 并将式(5)进行矩阵组合及变换, 可得支路电流与节点注入电流矩阵关系式:

$$\begin{bmatrix} I_{TSn \times 1} \\ I_{LS(m-n) \times 1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F_{n \times n} & F_{n \times n} P_{n \times (m-n)} \\ \mathbf{0}_{(m-n) \times n} & -E_{(m-n) \times (m-n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{n \times 1} \\ I_{LS(m-n) \times 1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, 矩阵 $F_{n \times n}$ 为 $H_{n \times n}$ 的逆阵。式中系数矩阵即为所求支路电流对节点注入电流矩阵 M_{IJ} 。

1.4 接地支路的等值

支路追加法和文献[15-17]所提算法, 均将接地支路视为连支处理, 使得网络的连支数远大于树支数, 从而造成计算量大为增加。为了解决这种情况, 本算法将接地支路进行等值, 以注入电流的形式表示, 并将原注入电流修正为:

$$J'_i = J_i + \sum_{j=n+1}^m k_{ij} I_j - y_{i0} V_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

其中, V_i 为节点 i 处节点电压, 规定接地支路的电流由节点 i 流向参考节点。

式(7)的矩阵表达式可写为:

$$J'_{n \times 1} = J_{n \times 1} + P_{n \times (m-n)} I_{LS(m-n) \times 1} - Y_{0n \times n} V_{n \times 1} \quad (8)$$

式中, Y_0 为各节点等效对地支路相对应的对地导纳矩阵。

KCL 定律可得树支电流与注入电流关系式:

$$I_{TSn \times 1} = -F_{n \times n} J'_{n \times 1} - F_{n \times n} P_{n \times (m-n)} I_{LS(m-n) \times 1} + F_{n \times n} Y_{0n \times n} V_{n \times 1} \quad (9)$$

将式(9)进行矩阵的组合与变换, 并将其代入节点电压与支路电流矩阵关系式(3)中得:

$$\begin{bmatrix} V_{n \times 1} \\ \mathbf{0}_{(m-n) \times 1} \end{bmatrix} = M_{VI} M_{IJ} \begin{bmatrix} J_{n \times 1} \\ I_{LS(m-n) \times 1} \end{bmatrix} - M_{VI} M_{IJ} M_Y \begin{bmatrix} V_{n \times 1} \\ \mathbf{0}_{(m-n) \times 1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, $M_{Y_{m \times m}} = \begin{bmatrix} Y_{0n \times n} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$ 。

将式(10)等号两边的节点电压列向量的系数矩阵合并, 并对其系数矩阵求逆, 可得:

$$\begin{bmatrix} V_{n \times 1} \\ \mathbf{0}_{(m-n) \times 1} \end{bmatrix} = (E_{m \times m} + M_{VI} M_{IJ} M_{Y_{m \times m}})^{-1} M_{VI} M_{IJ} \begin{bmatrix} J_{n \times 1} \\ I_{LS(m-n) \times 1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

令 $M_{VJ0} = (E_{m \times m} + M_{VI} M_{IJ} M_{Y_{m \times m}})^{-1} M_{VI} M_{IJ}$, M_{VJ0} 为计及网络等效接地支路的节点电压对节点注入电

流矩阵。则式 (11) 可简记为:

$$\begin{bmatrix} V_{n \times 1} \\ \mathbf{0}_{(m-n) \times 1} \end{bmatrix} = M_{VJ0} \begin{bmatrix} J_{n \times 1} \\ I_{LS(m-n) \times 1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

1.5 节点阻抗矩阵 Z_M 的求解

将矩阵 M_{VJ0} 分块为 $\begin{bmatrix} M_{n \times n} & M_{n \times (m-n)} \\ M_{(m-n) \times n} & M_{(m-n) \times (m-n)} \end{bmatrix}$, 利用 kron 消去法^[13]求解式 (12), 可得节点电压与节点注入电流的关系式:

$$V_{n \times 1} = [M_{n \times n} - M_{n \times (m-n)}(M_{(m-n) \times (m-n)})^{-1}M_{(m-n) \times n}]J_{n \times 1} \quad (13)$$

令 $Z_M = [M_{n \times n} - M_{n \times (m-n)}(M_{(m-n) \times (m-n)})^{-1}M_{(m-n) \times n}]$,

则由节点阻抗矩阵定义可知, Z_M 即为所求计及网络等效接地支路的节点阻抗矩阵。

2 算例分析

2.1 七节点算例系统

为了说明本算法的主体流程及验证其有效性, 作者设计了图 1 所示的 7 节点电力网络, 该网络中含有 7 个接地支路。电力网络参数为: $z_1=j1.0$, $z_2=j1.25$, $z_3=j0.5$, $z_4=j0.25$, $z_5=j0.625$, $z_6=j1.25$, $z_7=j0.5$, $z_8=j0.25$, $z_9=j0.25$; 互感 $z_{23}=j0.5$, $z_{68}=j0.5$; 对地等效支路 $z_{01}=j50.0$, $z_{02}=j40.0$, $z_{03}=j100.0$, $z_{04}=j50.0$, $z_{05}=j200.0$, $z_{06}=j50.0$, $z_{07}=j100.0$; 节点数 $n=7$, 支路数 (对地等效支路除外) $m=9$ 。通过深度搜索法, 确定网络的树支集与连支集。本例网络图中, 实线支路为树支, 虚线支路为连支。

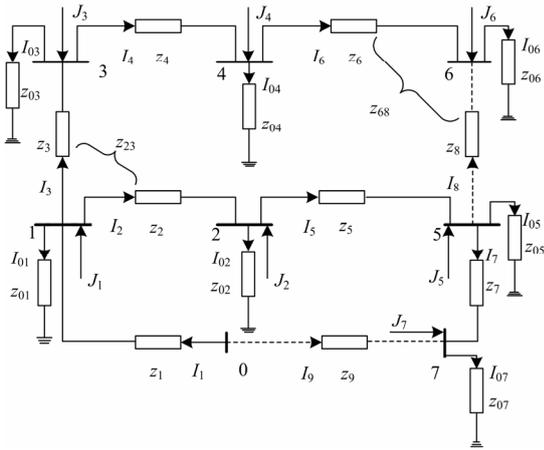


图 1 含等效接地支路的简单电力网络

Fig. 1 A simple network containing equivalent grounded-branches

步骤 1: 求解节点电压对支路电压矩阵 M_{VU}
根据式 (2) 可得节点电压与支路电压关系式:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \\ V_7 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \\ U_7 \\ U_8 \\ U_9 \end{bmatrix}$$

式中, 系数矩阵即为节点电压对支路电压矩阵 M_{VU} 。

步骤 2: 求解节点电压对支路电流矩阵 M_{VI}

将所求出的矩阵 M_{VU} 与网络的支路阻抗矩阵 Z 代入式 (3), 可得节点电压与支路电流的关系式:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \\ V_7 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.00 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.00 & 1.25 & 0.50 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.00 & 0.50 & 0.50 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.00 & 0.50 & 0.50 & 0.25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.00 & 1.25 & 0.50 & 0 & 0.625 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.00 & 0.50 & 0.50 & 0.25 & 0 & 1.25 & 0 & 0.50 & 0 \\ 1.00 & 1.25 & 0.50 & 0 & 0.625 & 0 & 0.50 & 0 & 0 \\ 0 & 0.75 & 0 & -0.25 & 0.625 & -0.75 & 0 & -0.25 & 0 \\ -1.00 & -1.25 & -0.50 & 0 & -0.625 & 0 & -0.50 & 0 & 0.25 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \\ I_9 \end{bmatrix}$$

式中, 系数矩阵即为节点电压对支路电流矩阵 M_{VI} 。

步骤 3: 求解支路电流对节点注入电流矩阵 M_{IJ}

根据式 (4), 可列出树支电流与节点注入电流和连支的矩阵关系式:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ J_4 \\ J_5 \\ J_6 \\ J_7 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_8 \\ I_9 \end{bmatrix}$$

将上式变换为式 (6) 的形式, 最终可以得到支路电流与节点注入电流关系式:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \\ I_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ J_4 \\ J_5 \\ J_6 \\ J_7 \\ J_8 \\ J_9 \end{bmatrix}$$

式中, 系数矩阵即为节点电压对支路电流矩阵 M_{IJ} 。

步骤 4: 求解计及网络等效接地支路的节点阻抗矩阵 Z_M

将步骤 2 与步骤 3 所求的矩阵 M_{VI} 和 M_{IJ} 及 M_Y 代入公式 (11) 得:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \\ V_7 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9057 & 0.8425 & 0.8676 & 0.8592 & 0.8347 & 0.8382 & 0.8305 & 0.0119 & 0.8305 \\ 0.8425 & 1.9635 & 1.2722 & 1.2597 & 1.9453 & 1.2290 & 1.9357 & -0.7041 & 1.9357 \\ 0.8676 & 1.2722 & 1.3101 & 1.2973 & 1.2604 & 1.2657 & 1.2541 & 0.0180 & 1.2541 \\ 0.8592 & 1.2597 & 1.2973 & 1.5322 & 1.2480 & 1.4948 & 1.2418 & 0.2617 & 1.2418 \\ 0.8347 & 1.9453 & 1.2604 & 1.2480 & 2.5465 & 1.2176 & 2.5339 & -1.3168 & 2.5339 \\ 0.8382 & 1.2290 & 1.2657 & 1.4948 & 1.2176 & 2.6779 & 1.2115 & 0.9870 & 1.2115 \\ 0.8305 & 1.9357 & 1.2541 & 1.2418 & 2.5339 & 1.2115 & 3.0188 & -1.3102 & 3.0188 \\ -0.0119 & 0.7041 & -0.0180 & -0.2617 & 1.3168 & -0.9870 & 1.3102 & -2.0637 & 1.3102 \\ -0.8305 & -1.9357 & -1.2541 & -1.2418 & -2.5339 & -1.2115 & -3.0188 & 1.3102 & -3.2688 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ J_4 \\ J_5 \\ J_6 \\ J_7 \\ J_8 \\ J_9 \end{bmatrix}$$

上式的系数矩阵即为矩阵 M_{VJ0} 。

将矩阵 M_{VJ0} 按式 (13) 所需矩阵分块, 并利用 kron 法作消去运算, 最终求得:

$$Z_M = \begin{bmatrix} 0.6174 & 0.3346 & 0.4323 & 0.3735 & 0.2584 & 0.2004 & 0.0860 \\ 0.3346 & 0.8139 & 0.5053 & 0.4889 & 0.4588 & 0.4429 & 0.1527 \\ 0.4323 & 0.5053 & 0.6528 & 0.5639 & 0.3902 & 0.3025 & 0.1298 \\ 0.3735 & 0.4889 & 0.5639 & 0.6856 & 0.4340 & 0.3077 & 0.1444 \\ 0.2584 & 0.4588 & 0.3902 & 0.4340 & 0.5233 & 0.5667 & 0.1742 \\ 0.2004 & 0.4429 & 0.3025 & 0.3077 & 0.5667 & 0.8194 & 0.1886 \\ 0.0860 & 0.1527 & 0.1298 & 0.1444 & 0.1742 & 0.1886 & 0.2244 \end{bmatrix}$$

此结果与节点导纳矩阵求逆算法及文献[15]提及的算法得到的结果一致。

2.2 其他系统算例

为了进一步验证本算法的有效性及其高效性, 在 Windows XP 系统、CPU T2050、512M 内存和 Matlab 7 软件环境下, 针对不同规模的电力网络, 将本文算法与文献[15]算法进行形成节点阻抗矩阵计算时间的对比, 结果见表 1。

表 1 两种算法形成节点阻抗矩阵的运行时间比较

Tab.1 Comparison of CPU time between two methods

规模				运行时间/s	
n	b	g	m	文献[15]算法	本文算法
7	9	7	2	0.004	0.003
325	517	319	42	1.078	0.912
610	1 143	598	86	2.063	1.671
1 303	2 287	1 241	156	4.687	3.572

注: n 为节点数, b 为支路数, g 为等效接地支路数, m 为互感对数。

2.3 算例小结与讨论

(1) 本文 2.1 节的七节点算例, 若采用文献[15]的算法计算, 即将接地支路归为连支处理, 则形成的过渡矩阵 M_{VI} 、 M_{IJ} 及 M_{VJ} 的维数皆为 16×16 阶, 使得过渡矩阵的形成过程相当复杂, 并且在利用 kron 法进行分块及作消去运算的的矩阵也为 16×16 阶, 其计算量也相当大。而采用本算法, 则形成的所有过渡矩阵皆为 9×9 阶, 其减少的行数、列数对应于接地支路数 (本例为 $n=7$)。

(2) 由本文 2.2 节的其他算例系统计算结果可见, 本文算法有效降低了形成过渡矩阵过程中的计算量, 同时大大减少了利用 kron 法对矩阵作消去运算时的计算时间, 在计算效率方面具有优越性, 较其他过渡矩阵法及传统计算节点阻抗矩阵的方法都

简便、省时; 并且当电网规模越大、等效对地支路愈多时, 本方法计算效率的优越性愈加明显。

(3) 本文相对于文献[15], 将求解 M_{IJ} 的方法加以简化, 使得过渡矩阵 M_{IJ} 的形成更加便捷; 而且, 本文的算法在形成过渡矩阵 M_{VI} 时, 是利用矩阵 M_{VU} 与 Z 得到的, 此过程包含了更多的网络信息, 并且使求解过程更加清晰化。

(4) 当遇到有新增对地支路的情况时, 若利用其他方法, 需要重新生成过渡矩阵进行计算; 而利用本文的算法, 不需要对过渡矩阵进行任何改变, 只需将矩阵 M_Y 进行相应的修改, 再利用公式 (11) 进行计算即可。

3 结论

本文提出了一种能够有效处理接地支路的形成节点阻抗矩阵的改进算法。该算法利用三个过渡矩阵 M_{VU} 、 M_{VI} 和 M_{IJ} , 计算出计及接地支路的节点电压对节点注入电流矩阵 M_{VJ0} , 最终再利用 kron 法求得节点阻抗矩阵。算例分析验证了所提算法的有效性和高效性。

该算法在计算计及等效接地支路的节点阻抗矩阵时, 解决了可能出现的连支数大于树支数的状况, 使得其形成的过程及计算既快速又简便。当电力网络规模越大, 所含互感支路及等效对地支路越多时, 该算法的优势就越明显; 并且其形成的过渡矩阵能够有效地反映出丰富的网络信息, 为电力系统分析提供了一种有效的分析工具。

参考文献

- [1] 曲绍杰, 高玉领, 邹林, 等. 基于FVSI指标的电压稳定约束无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (10): 10-14.
QU Shao-jie, GAO Yu-ling, ZOU Lin, et al. Reactive power optimization with voltage stability margin considered based on fast voltage stability index[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (10): 10-14.
- [2] 顾秀芳. 10 kV配电网中性点不接地短路电流的分析[J]. 继电器, 2008, 36 (5): 14-18.
GU Xiu-fang. Analysis on short-circuit current of 10 kV distribution network with neutral point ungrounded[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (5): 14-18.
- [3] 余胜, 许钢, 余琼, 等. 不同电压等级同杆并架多回线路的故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (6): 44-47.
YU Sheng, XU Gang, YU Qiong, et al. Fault location for multiple circuit overhead lines of different voltage grade on the same tower[J]. Power System Protection and

- Control, 2009, 37 (6): 44-47.
- [4] 王小君, 鲍海. 电力系统节点输电网损成本分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (13): 120-124.
WANG Xiao-jun, BAO Hai. Node network loss cost analysis method in transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (13): 120-124.
- [5] 罗庆跃, 李晓明, 等. 零阻抗支路在短路故障计算机分析中的应用[J]. 电工技术学报, 2005, 20 (4): 107-110.
LUO Qing-yue, LI Xiao-ming, et al. Application of zero impedance branch for computer's analyses on short-circuit fault[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20 (4): 107-110.
- [6] 石东源. 电力系统故障计算中互感线路的处理[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (7): 58-61.
SHI Dong-yuan. Treatment of lines with mutual inductance in power system fault calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (7): 58-61.
- [7] Teng J H, Su Y S, et al. Decomposition approach and analysis for a Z-matrix building process[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151 (5): 638-643.
- [8] 李伟, 鲍海, 等. 基于功率分量理论的网损分摊问题[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (25): 157-160.
LI Wei, BAO Hai, et al. Problem of loss allocation based on power components theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (25): 157-160.
- [9] 陈圻. 电力系统稳态分析[M]. 二版. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [10] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 二版. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [11] 米麟书, 刘芳宁. 电力系统故障的计算机辅助分析[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1992.
- [12] 苏小林, 阎晓霞. 提高节点阻抗矩阵支路追加法的效率分析[J]. 电力学报, 2004, 19 (2): 91-94.
SU Xiao-lin, YAN Xiao-xia. Efficiency analysis for improving brand additional method of node impedance matrix[J]. Journal of Electric Power, 2004, 19 (2): 91-94.
- [13] Whei Minlin, Yuh Sheng, et al. A new building algorithm for Z-matrix[C]. //IEEE Power System Technology, Proceedings Power International Conference. 2000, 20 (4): 1041-1046.
- [14] 乐全明, 郁惟镛, 杜俊红. 一种计及支路互感的形成节点阻抗矩阵新方法[J]. 电网技术, 2004, 28 (19): 42-46.
YUE Quan-ming, YU Wei-yong, DU Jun-hong. A new building algorithm for Z-matrix considering branch mutual-inductance[J]. Power System Technology, 2004, 28 (19): 42-46.
- [15] 乐全明, 郁惟镛, 杜俊红. 一种形成节点阻抗矩阵的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (2): 34-39.
YUE Quan-ming, YU Wei-yong, DU Jun-hong. An improved novel algorithm for building Z-matrix[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (2): 34-39.
- [16] LIU Bao-zhu, LI Bo-long. A general algorithm for building Z-matrix based on transitional matrices[C]. //IEEE Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing(China): 2008: 794-797.
- [17] 冯天民, 刘宝柱, 鲍海. 一类含CCCS网络形成节点阻抗矩阵的新算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24 (2): 139-144.
FENG Tian-min, LIU Bao-zhu, BAO Hai. A novel algorithm for building Z-matrix of electric power network including CCCS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24 (2): 139-144.
- [18] 王承民, 蒋传文. 基于支路电流状态变量的灵敏度分析方法研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21 (1): 42-46.
WANG Cheng-min, JIANG Chuan-wen. Research on sensitivity analysis method based on line current variable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21 (1): 42-46.
- [19] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [20] 邱关源. 电路[M]. 四版. 北京: 高等教育出版社, 1999.

收稿日期: 2009-11-26; 修回日期: 2010-02-03

作者简介:

杨美佳 (1984-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统运行、分析与控制研究; E-mail: yangmeijia119@tom.com

刘宝柱 (1974-), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统运行、分析与控制的研究工作。

(上接第 160 页 continued from page 160)

- [14] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (1): 35-40.
CHEN Hai-yan, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong. Study on power flow calculation of distribution systems with DGs[J]. Automaiton of Eelertic Power Sysetms, 2006, 30 (1): 35-40.

收稿日期: 2009-09-15; 修回日期: 2009-12-23

作者简介:

冯希科 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为风力发电原理、分布式电源的并网特性及保护; E-mail: esport06@163.com

邵能灵 (1972-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护、电力系统安全控制。