

基于网络分块算法的静态安全快速计算方法

王方雨¹, 刘文颖¹, 田 浩¹, 梁 琛², 郑晶晶²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206;

2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 传统的静态安全分析需要对预想故障集中的预想故障进行多次网络重构和潮流计算, 计算量和计算时间随电网规模的增大而快速增加, 使得静态安全分析在实时分析和预警中不能满足全网分析的需求。提出一种基于网络分块算法的新型迭代方法, 将全网合理划分为较为均匀的子网络, 降低网络矩阵的维数, 通过边界协调变量联系各子网络, 有效提高计算速度。基于静态安全分析中故障潮流的特点提出适用于该算法的弱收敛性条件, 该收敛条件使得每步迭代的计算量随迭代次数增加快速减少。仿真分析证明所提收敛条件容易达到, 使得所提算法具有良好的收敛性。

关键词: 网络分块算法; 协调变量; 故障潮流; 改进牛拉法; 弱收敛条件; 静态安全

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.031

0 引言

传统的静态安全分析方法需要形成预想事故集合并对其中的每种事故进行网络重构和潮流计算, 得出故障后电网的各个运行变量, 从而判断电网的静态安全性。且潮流计算的计算量与电力系统中的独立节点数密切相关, 在应用牛顿-拉夫逊法计算时, 其雅可比矩阵的阶数为 $2N-2$, 在迭代过程中雅可比矩阵的数值不断发生变化, 对于大规模电力系统而言, 其计算量十分庞大, 即使使用收敛速度较快的 PQ 分解算法, 忽略电压幅值以及电压相位的影响并且将雅可比矩阵常量化, 其计算耗时依然十分可观, 严重束缚了电网运行的静态安全分析速度^[1]。

针对上述问题, 国内外学者做了大量研究, 其研究主要集中在 $N-1$ 元件断开后功率再分配和潮流的快速算法上。例如在元件开断后功率再分配的研究问题上, 文献[2]在常规计算灵敏度的基础上, 计算基态潮流状态下网络结构变化后各节点注入功率对支路有功变化的灵敏度, 从而计算功率的重新分配; 文献[3-4]提出利用补偿法进行静态安全计算的方法, 该方法收敛性和收敛速度均较好, 但该方法多适用于含 PV 节点的配电系统。在潮流快速算法的研究方面, 文献[5]提出了静态安全计算的相关处理原则和相关快速计算技术等, 为静态安全潮流快速计算奠定了基础; 文献[6]利用稀疏矢量技术解决了

静态安全潮流计算内存占用较大的问题; 文献[7-9]则从概率潮流和随机潮流算法的角度进行静态安全分析, 虽精度提高, 但算法较为复杂; 文献[10-12]从并行计算的角度对潮流计算进行分析, 适用于复杂电力网络, 但由于该方法基于传统牛顿收敛条件, 收敛性较差。这些研究对静态安全计算的发展起到了巨大的作用, 但依然存在算法适用性较小、算法复杂程度高以及收敛性差等问题。

基于此, 本文提出了一种基于网络分块算法的静态安全分析方法, 将全网合理划分为较为均匀的子网络, 降低了网络矩阵的维数, 通过边界协调变量联系各子网络, 有效提高了计算速度。并且本文提出了适用于该算法的弱收敛条件, 该收敛条件充分利用了静态 $N-1$ 安全分析的特点, 使得该算法具有良好的收敛性。

1 改进网络分块算法理论分析

现代电力网络拓扑关系日益复杂, 系统往往采取“分区分层”的调度管理模式, 这为网络分块算法创造了有利条件。同时分区子网间的边界也将从单一的支路切割或节点撕裂转变为混合分割, 因此本文将主要分析统一网络分块算法模型, 而节点撕裂和支路切割也是该模型的特殊情形。

1.1 统一网络分块算法分析

对于给定的电力网络, 其用导纳矩阵描述的网络方程为:

$$YU=I \quad (1)$$

其中, Y 为 $N \times N$ 阶节点导纳矩阵; U 为 N 维节点电压列矢量; I 为 N 维节点电流列矢量。选择该网络的部分节点作为撕裂节点, 部分支路作为切割支路, 将网络划分为 K 个子网络, 将这些边界节点及支路排在

收稿日期: 2016-08-12; 修回日期: 2017-02-22

基金项目: 国家科技支撑计划 (2015BAA01B04); 国家电网公司科技项目 (52272214002C)

Project supported by the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2015BAA01B04) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (52272214002C)

发明专利: 一种基于网络分块牛顿法的大规模电网静态安全快速算法 (2016102104254)

后面,并将同一子网络的节点排在一起,得到对角形式的网络方程:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & & & Y_{1l} & M_1 \\ & Y_{22} & & Y_{2l} & M_2 \\ & & \ddots & \vdots & \vdots \\ & & & Y_{KK} & Y_{Kl} & M_K \\ Y_{1l}^T & Y_{2l}^T & \cdots & Y_{Kl}^T & Y_l \\ M_1^T & M_2^T & \cdots & M_K^T & -y_l^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_K \\ U_l \\ i_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_K \\ I_l \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, Y_{ii} 为第 i 个子网络的自导纳矩阵; M_i^T 为第 i 个边界支路的关联矢量; Y_{il} 为第 i 个子网络与边界节点的互导纳矩阵; y_l 为切割线路导纳矩阵; i_l 为切割线路电流列矩阵。

将式(2)中导纳矩阵写成分块矩阵形式,得:

$$\begin{bmatrix} Y_{II} & Y_{IT} \\ Y_{IT}^T & Y_{TT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_I \\ U_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_I \\ I_T \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$U_T = \begin{bmatrix} U_l \\ i_l \end{bmatrix}, \quad I_T = \begin{bmatrix} I_l \\ 0 \end{bmatrix}$$

其中, U_T, I_T 为边界协调变量。令:

$$\begin{cases} Y_{TT}' = Y_{TT} - Y_{IT}^T Y_{II}^{-1} Y_{IT} = Y_{TT} - \sum_{i=1}^K Y_{iT}^T Y_{ii}^{-1} Y_{iT} \\ I_T' = I_T - Y_{IT}^T Y_{II}^{-1} I_I = I_T - \sum_{i=1}^K Y_{iT}^T Y_{ii}^{-1} I_i \end{cases} \quad (4)$$

消去式(2)中各子网络所对应的部分,只保留边界部分,得:

$$Y_{TT}' U_T = I_T' \quad (5)$$

由式(5)得出边界协调变量后便可用下式求解各子网络的电压向量。

$$Y_{ii} U_i = I_i' - Y_{iT} U_T \quad i=1, 2, \dots, K \quad (6)$$

由于各子网络间除边界变量外互不相干, Y_{ii} 是块对角矩阵,故可以对子系统进行独立求解,降低了计算矩阵维数,增加了计算速度。对于子网络浮空造成节点导纳矩阵奇异的现象,可采用文献[3]中的方法加以解决,此处不再深入研究。

1.2 网络分块形式的牛顿法分析

在进行实际电网的潮流计算时,已知量往往是节点的注入功率,以电流注入不变计算不符合实际情况。因此上述网络分块算法的基础模型需要做相应改进才能运用到潮流计算当中。从传统牛顿法的潮流修正方程出发,对网络分块算法进行改进。牛顿法的潮流修正方程为:

$$-\begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (7)$$

由雅可比矩阵的性质可知:雅可比矩阵的非对角元素与节点导纳矩阵的非对角元素有关,当 $Y_{ij}=0$ 时, $J_{ij}=0$, 因此,雅可比矩阵与节点导纳矩阵具有相同的稀疏格式,因此可以按子网排列并写成如式(3)所示的边界形式,得:

$$\begin{bmatrix} J_{II} & J_{IT} \\ J_{IT}^T & J_{TT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_I \\ \Delta U_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta S_I \\ \Delta S_T \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$J_{II} = \text{diag}(J_{11}, J_{22}, \dots, J_{KK})$$

$$\Delta U_I = (\Delta U_1, \Delta U_2, \dots, \Delta U_K)^T$$

$$\Delta S_I = (\Delta S_1, \Delta S_2, \dots, \Delta S_K)^T$$

$$\Delta U_i = (\Delta\theta_{1i}, \Delta U_{1i}, \Delta\theta_{2i}, \Delta U_{2i}, \dots, \Delta\theta_{n_i i}, \Delta U_{n_i i})^T$$

$$\Delta S_i = (\Delta P_{1i}, \Delta Q_{1i}, \Delta P_{2i}, \Delta Q_{2i}, \dots, \Delta P_{n_i i}, \Delta Q_{n_i i})^T$$

其中, J_{ii} 为子网 i 的雅可比矩阵; K 为系统中子网络的个数; n_i 为子网 i 中独立节点的个数。若子网 i 中的某节点 p 为 PV 节点,则该节点的相应位置以 $\Delta\theta_{pi}$ 、 ΔP_{pi} 代替 $(\Delta\theta_{pi}, \Delta U_{pi})$ 、 $(\Delta P_{pi}, \Delta Q_{pi})$ 。

基于式(8),按照网络分块算法的步骤,可将式(4)~(6)改写为:

$$\begin{cases} J_{TT}' = J_{TT} - J_{IT}^T J_{II}^{-1} J_{IT} = J_{TT} - \sum_{i=1}^K J_{iT}^T J_{ii}^{-1} J_{iT} \\ \Delta S_T' = \Delta S_T - J_{IT}^T J_{II}^{-1} \Delta S_I = \Delta S_T - \sum_{i=1}^K J_{iT}^T J_{ii}^{-1} \Delta S_i \end{cases} \quad (9)$$

边界协调变量为:

$$J_{TT}' \Delta U_T = \Delta S_T' \quad (10)$$

由协调变量推导得出的各子网电压向量为:

$$J_{ii} \Delta U_i = \Delta S_i' - J_{iT} \Delta U_T \quad i=1, 2, \dots, K \quad (11)$$

由上述分析可知,对于潮流计算这种典型的非线性方程,上(边界)、下(各子网)级之间需要多次交换信息,每次交换时均可以采用网络分块算法,可有效提高潮流计算的速度。而对于线性网络只需交换一次便可得到全网的潮流解。本文利用式(9)~(11)着重对非线性的潮流方程组进行求解。

2 静态安全故障潮流计算收敛判据分析

在进行静态安全分析时,首先形成预想事故集,这些事故有 2 种故障类型^[13]:一种为交流线路因故退出运行,另一种为电力元件(变压器等)因故退出运行。前者不会改变节点导纳矩阵的阶数,后者会降低维数,为了方便叙述,维持原维数不变,相应元素置零。

2.1 网络故障电气量的赋定方程分析

假设某电网含 K 个子网络,其中子网络 k 中的某些节点或线路因故退出运行,故障后的网络方程^[14-15]为:

$$Y_a U_a = I_a \quad (12)$$

其中,下标 a 代表故障后标志; Y_a 为故障后的节点导纳矩阵。电力系统中给定的是节点的注入功率,这两者间的关系为:

$$\hat{E}_a I_a = \hat{S}_a \quad (13)$$

其中, $\hat{S}_a$ 为 S_a 的共轭, S_a 为节点的注入复功率; $\hat{E}_a = \text{diag}(\hat{U}_i)$ 。

结合式(12)可得:

$$\hat{S}_a = \hat{E}_a Y_a U_a \quad (14)$$

若设下标 s 为故障前网络状态标志,则有:

$$\hat{S}_a = (\hat{E}_s + \Delta \hat{E})(Y_s + \Delta Y)(U_s + \Delta U) \quad (15)$$

展开式(15)并假设网络故障前后注入有功功率不变,得:

$$f_{(U,Y)}(\Delta U, \Delta Y) =$$

$$H(\Delta U, \Delta Y)U_s + [\hat{E}_s Y_s + H(\Delta U, \Delta Y)]\Delta U = 0 \quad (16)$$

$$H(\Delta U, \Delta Y) = \hat{E}_s \Delta Y + \Delta \hat{E} Y_s + \Delta \hat{E} \Delta Y$$

$$\hat{E}_s = \text{diag}(\hat{U}_s), \Delta \hat{E} = \text{diag}(\Delta \hat{U})$$

由式(16)可知,对于网络的每种故障 ΔY ,网络潮流的解必然满足该式,此式即为原网络结构关于 $(\Delta U, \Delta Y)$ 的赋定关系。且对于每种故障后网络潮流是否有解以及是否多解也是由该赋定关系解的性质决定的。因此在进行潮流计算前可对该式进行分析,判断该式解的性质,初步了解该网络的潮流性质。

2.2 弱收敛条件分析

理论上,当 ΔY 已知时,可利用式(16)反解求出 ΔU ,但这种计算实际上很难进行,当知道 $(\Delta U, \Delta Y)$ 的值时,却可以很方便地计算出 $f_{(U,Y)}(\Delta U, \Delta Y)$ 的值。因此可以将该赋定关系作为潮流计算收敛的判据,即潮流收敛时应满足:

$$f_{(U,Y)}(\Delta U, \Delta Y) \leq \varepsilon \quad (17)$$

其中, ε 为以精度值 ε 构成的列向量。当 ΔU 变化不是很大时, ΔU 中每个元素的值远小于 1,可忽略 ΔU 的二次方项,即忽略 $\Delta \hat{E}(Y_s + \Delta Y)\Delta U$ 项,此时,式(17)可线性化为:

$$f_{(U,Y)}(\Delta U, \Delta Y) \approx H(\Delta U, \Delta Y)U_s + \hat{E}_s(Y_s + \Delta Y)\Delta U \leq \varepsilon \quad (18)$$

其第 k 行公式为:

$$f_{k(U,Y)}(\Delta U, \Delta Y) = \alpha_1 \Delta U_1 + \alpha_2 \Delta U_2 + \cdots + \alpha_N \Delta U_N$$

其中, N 为节点总数。

对上述电压变化量系数大小进行排序,设其最大值为 α_i ,其所对应的项为控制 f_k 值的主导项,该主导项的电压变化量称为赋定关系 f 第 k 行的主导电压变化量。当 f_k 的值达到精度要求时,可以认为该行主导电压变化量达到合理范围,因此对式(18)所示的收敛条件可做如下处理:当赋定表达式第 k 行数据达到精度要求时,即 $f_{k(U,Y)}(\Delta U, \Delta Y) \leq \varepsilon_i$ 时,该行的主导电压变化量仅参与迭代计算,自身数据不再更新,即 $\Delta U_i|_{\alpha_i=\max(\alpha)}$ 的值在迭代过程中保持不变。

本文将经过处理的式(18)称为弱收敛条件,相比较传统牛顿-拉夫逊算法迭代过程中最后电压修正量 $\|e_k\| \leq \varepsilon$ 或最大电压修正量 $|\max(e_k(i))| \leq \varepsilon$ 的强收敛条件而言,此收敛条件更容易达到,而且迭代步数也会略有减少。

3 静态安全分析快速求解步骤

结合式(9)~(11)、(17)可得全网故障后的电压、电流,具体步骤如下。

a. 形成初始电网节点导纳矩阵,运用牛顿-拉夫逊法计算全网潮流,得出电压分量 U_s 的极坐标形式,根据“分区分层”的概念形成子网边界(本文认为子网已划分),形成各子网电压向量 U_i 。

b. 设置故障类型,修改节点导纳矩阵,未发生故障的子网导纳矩阵不变,对于发生故障的子网,节点退出运行,相应位置置零,线路退出运行,相应位置加减该线路导纳。

c. 计算各子网雅可比矩阵 J_i ,设置故障子网电压偏移量初值 $\Delta U_i^{(0)}$,计算该子网功率偏移量 $\Delta S_i^{(0)}$,其他子网电压及功率偏移量均为 0,各子网上传本网络雅可比矩阵和电压功率偏移量信息。

d. 协调级根据式(9)计算边界雅可比矩阵以及边界功率偏移量,并根据式(10)计算边界电压偏移量 ΔU_T ,将计算得到的边界电压偏移量下载到各子网。

e. 各子网根据上传得到的信息,依据式(11)计算本网络新的电压偏移量 $\Delta U_i^{(0)}$,并依据式(18)判断偏移量是否满足精度要求。若满足要求,则结束迭代,否则将新得到的电压偏移量作为初值转步骤 c 继续迭代,迭代标号加 1。对于已经满足精度的节点,仅上传信息不修改。

f. 根据故障前电压状态变量 U_s 和故障后的电压偏移量 ΔU 计算网络故障后的电压变量。

从上述的迭代以及收敛条件的处理过程中可知:当赋定关系某一行数据满足精度要求时,该行主导电压变化量仅仅参与迭代不再参与修改计算,而在其他节点更新的过程中,很可能会在此改变该节点的电压值,另一方面,以主导量代替 f_k 本身也不精确。因此式(17)所描述的弱收敛条件实际放宽了收敛的范围,最终计算结果会产生误差,经过仿真证明,误差在工程精度范围内,但相应的收敛性能有很大提高。并且每当一行数据达到精度要求就会有一个节点的电压值在迭代过程中保持不变,每次迭代的计算量会随迭代次数的增加而快速减少,计算总时间也会减少很多,体现了该算法良好的计算速度以及收敛性。由于收敛条件处理时认为网络结构变化后潮流变化不是很大,因此该算法不适用于病态网络^[16]的故障求解。

4 仿真实验

4.1 测试系统及计算环境简介

利用 MATLAB 程序对本文算法进行编程,对表 1 所示的系统进行仿真计算,将计算结果与电力系统

综合程序(PSASP)计算结果进行分析比较,PSASP 算法采用高斯法和牛顿法分别进行分析计算,验证程序计算环境为:Pentium(R)Dual-Core CPU 2.80 GHz, 2.00 GB RAM,Windows 7 32 Bytes operating system。测试信息如表 1 所示。

表 1 测试系统概况表
Table 1 Profile of test systems

系统名称	节点数	支路数
IEEE 30 节点系统	30	
IEEE 300 节点系统	300	409
华东 3647 节点系统	3647	4239
华东 5473 节点系统	5473	6393
国网 21479 节点系统	21479	26736

为了验证本文算法的合理性,将上述系统分成 2 个算例进行分析计算。算例 1 采用本文算法对 IEEE 30 节点系统实行静态安全潮流计算,仿真验证所编程序的正确性以及验证不同故障严重程度对潮流结果的影响。算例 2 分别采用高斯法、牛顿法和本文算法对 IEEE 300 节点系统、华东 3647 节点系统、华东 5473 节点系统以及国网 21479 节点系统进行静态安全潮流计算,仿真验证本文所提算法的快速性和准确性以及所提算法对大系统应用的通用性。

4.2 算例 1

不同故障的严重程度会对弱收敛条件表达式的精确程度产生影响,故障越严重,网络结构变化越大,对故障后潮流分布影响越大,忽略电压变化量,最终计算结果的误差会有所增加,但误差在允许范围内。以 IEEE 30 节点系统讨论不同故障程度对其静态安全潮流结果的影响。IEEE 30 节点测试系统如图 1 所示,图中虚线部分表示严重故障集合元件。

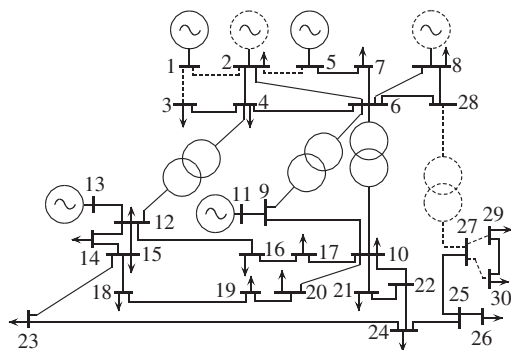


图 1 IEEE 30 节点系统接线图

Fig.1 Wiring diagram of IEEE 30-bus system

仿真时将该网络划分为 2 个子网络分别为 $S_1=\{1,2,3,4,12,13,14,15,16,17,18,19,20,23\}$, $S_2=\{5,6,7,8,9,10,11,21,22,24,25,26,27,28,29,30\}$; 边界集合 $E=\{(LN2-5), (LN2-6), (LN4-6), (LN10-17), (LN10-20), (LN23-24)\}$ 。

本次仿真分析中,静态安全分析故障集合取 IEEE 30 节点系统中所有独立元件的集合,包括所有发电

机、变压器和输电线路。由文献[9]可知,该系统静态安全最严重故障集合如表 2 所示,表中最低电压为标么值。

表 2 IEEE 30 节点系统静态安全严重故障分析表
Table 2 Serious static security fault set of IEEE 30-bus system

故障元件	越限数	最大支路越限程度/%	最低电压
Gen2	1	108.3	—
Gen8	1	119.3	—
LN1-2	2	113.1	—
LN1-3	1	109.4	—
LN2-5	2	110.3	—
LN27-29	1	—	0.964
LN27-30	1	—	0.954
TR27-28	7	131.0	0.869

注:表中 Gen2、Gen8 分别表示连接在母线 2 和母线 8 上的发电机;LN1-2 表示连接母线 1 和母线 2 之间的支路;最大支路越限程度是指流过支路的最大潮流与支路额定容量的比值。

采用上述最严重故障仿真计算时,计算结果误差最大,网络拓扑结构变化较大,潮流收敛性能也最差,若最严重故障状态下可以满足静态安全潮流计算要求,则其余 $N-1$ 元件退出运行也可以满足该要求。

4.2.1 故障严重程度对潮流收敛速度的影响

本文主要从迭代步数和计算时间 2 个层面讨论故障严重程度对潮流收敛速度的影响。表 3 给出了几种故障下弱收敛主导 f 值随迭代步数的变化表,表 4 给出了不同故障程度下本文算法计算时间的变化表。

表 3 不同故障下主导 f 值随迭代步数的变化表
Table 3 Variation of convergence criterion f vs. iteration turns for different faults

迭代步数	主导 f 值			
	TR27-28	LN1-2	LN2-5	LN1-3
1	1.4×10^{-4}	1.1×10^{-4}	9.2×10^{-5}	6.3×10^{-5}
2	6.9×10^{-5}	6.3×10^{-5}	5.1×10^{-5}	3.8×10^{-5}
3	3.7×10^{-5}	2.6×10^{-5}	1.1×10^{-5}	2.1×10^{-5}
4	9.6×10^{-6}	9.8×10^{-6}	6.4×10^{-6}	1.0×10^{-5}
5	7.3×10^{-6}	4.2×10^{-6}	3.2×10^{-6}	9.5×10^{-7}
6	5.4×10^{-6}	2.4×10^{-6}	2.0×10^{-6}	—
7	2.2×10^{-6}	1.1×10^{-6}	9.7×10^{-7}	—
8	1.3×10^{-6}	9.9×10^{-7}	—	—
9	9.7×10^{-7}	—	—	—

表 4 不同故障下计算时间表
Table 4 Calculation time for different faults

故障元件	计算时间/ μs	故障元件	计算时间/ μs
TR27-28	8.933	LN2-5	7.948
LN1-2	8.887	LN1-3	5.393

由表 3、4 可知:

a. 在严重故障状态下,本文算法的弱收敛 f 值可以很快降低到精度要求之下,随着故障程度的增加,主导 f 值的收敛速度会有所降低,但依然保持着良好的收敛性,对于非静态 $N-1$ 故障分析,本文算

法可能不收敛;

b. 在相同的网络拓扑下,本文算法的计算时间会随故障程度的增加有所增加,但增加程度不显著。

4.2.2 故障严重程度对潮流精确度的影响

采用 MATLAB 编程,对不同的收敛判据,将本文算法的计算结果与高斯法进行比较,计算的收敛判据为: $\varepsilon=0.0001$ 。计算结果如表 5 所示。

表 5 严重故障状态下不同算法计算误差比较表
Table 5 Comparison of calculation errors between different algorithms for serious faults

故障 母线	TR27-28 故障			LN1-2 故障		
	高斯法	本文 算法	误差/%	高斯法	本文 算法	误差/%
2	1.0450	1.0450	0	1.0450	1.0450	0
4	0.9990	1.0002	0.12	1.0144	1.0232	0.09
5	1.0100	1.0100	0	1.0100	1.0100	0
6	1.0059	1.0087	0.28	1.0114	1.0125	0.11
8	1.0100	1.0100	0	1.0100	1.0100	0
10	1.0288	1.0296	0.29	1.0320	1.0198	-0.36
11	1.0500	1.0500	0	1.0500	1.0500	0
12	1.0209	1.0216	0.07	1.0436	1.0426	-0.09
13	1.0500	1.0500	0	1.0500	1.0500	0
14	1.0074	1.0085	0.81	1.0287	1.0193	0.91
15	1.0069	1.0012	-0.09	1.0240	1.0232	-0.08
28	1.0026	1.0059	0.33	1.0072	1.0033	-0.04

由表 5 可知:

a. 本文所提新算法计算结果精度会随故障程度的增加而有所下降,对于非静态 $N-1$ 故障分析,本文算法计算结果误差可能会有所增大;

b. 在这 2 种最严重的预想故障元素下,本文所提新算法所计算出的节点电压值与高斯法计算得到的误差很小,均小于 1%,满足工程实践的要求,说明该算法具有较高的准确性。

4.3 算例 2

4.3.1 新算法快速性仿真验证

按照算例 1 中的仿真方法分别对 IEEE 300 节点系统、华东 3647 节点系统、华东 5473 节点系统以及国网 21479 节点系统进行静态安全潮流计算,计算得出每个系统严重故障状态下迭代步数随精度要求变化曲线图和弱收敛主导 f 值随迭代步数的变化曲线图,分别如图 2 和图 3 所示。

由图 2 可知:对于大系统,本文所提新算法的速度优势更加明显,在相同精度下,相对于牛顿法和高斯法,本文算法收敛时所需的迭代步数急剧下降,且该算法对精度要求不敏感,当精度要求增加时,迭代步数的几何增长规律不明显,大幅提高了计算速度。

由图 3 可知:相对于传统潮流计算方法,本文所提弱收敛条件具有较大的收敛优势。弱收敛条件忽略了部分电压变化量的影响,降低了对收敛精度的要求,使得主导 f 值可以迅速下降到精度要求以下,不仅显著提高了算法的收敛性,还极大地提高了算法

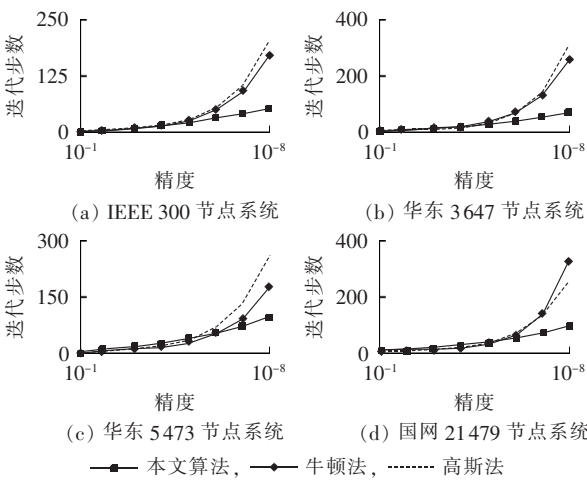


图 2 严重故障状态下迭代步数随精度要求变化曲线图
Fig.2 Curve of iteration turns vs. required precision for serious fault

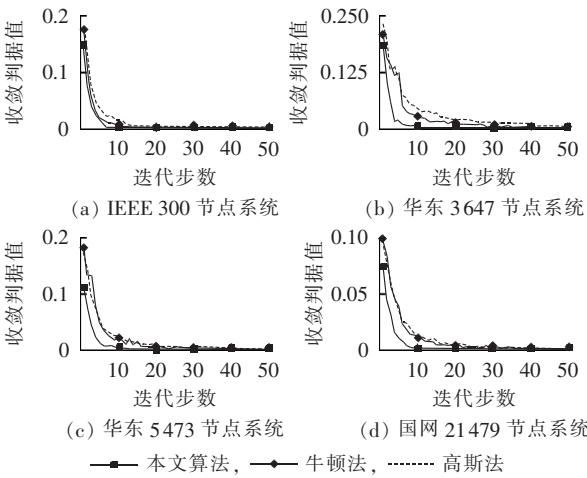


图 3 弱收敛主导 f 值随迭代步数的变化曲线图
Fig.3 Curve of convergence criterion f vs. iteration turns

的收敛速度。

4.3.2 新算法精确性仿真验证

对于大系统,从每个元件的误差难以得出结果的整体误差,为此,本文采用下述 4 个指标表征本文算法计算结果的总体误差。

a. 重要节点平均电压综合误差指数。

$$\delta_u = \frac{1}{N_n} \sum_{n=1}^{N_n} |u_n - u_{ref}|$$

其中, N_n 为重要节点数目; u_{ref} 为标准参考电压,由传统潮流算法得到。

b. 重要节点电压综合标准差指数。

$$d_u = \sqrt{\frac{1}{N_n} \{ [abs(u_n - u_{ref})]^2 - \delta_u^2 \}}$$

c. 重要支路平均电流综合误差指数。

$$\delta_i = \frac{1}{N_b} \sum_{n=1}^{N_b} |i_n - i_{ref}|$$

其中, N_b 为重要支路数目; i_{ref} 为标准参考电流,由传统潮流算法得到。

d. 重要支路电流综合标准差指数。

$$d_i=\sqrt{\frac{1}{N_b}\{[\text{abs}(i_n-i_{\text{ref}})]^2-\delta_i^2\}}$$

经过计算得出严重故障下计算结果误差指数表,如表 6 所示。

表 6 严重故障下误差指数分析表
Table 6 Error indexes for serious fault

测试系统	$\delta_u/\%$	$d_u/\%$	$\delta_i/\%$	$d_i/\%$
IEEE 300 节点系统	0.47	0.65	0.43	0.57
华东 3647 节点系统	0.32	0.31	0.29	0.34
华东 5473 节点系统	0.15	0.23	0.17	0.31
国网 21479 节点系统	0.21	0.55	0.24	0.52

由表 6 可知:对于大型电力系统,本文新提算法所计算出的潮流结果与参考值误差也较小,说明本文算法对复杂电力系统也具有较好的适用性。另外,给出严重故障状态下电压误差散点图,如图 4 所示。

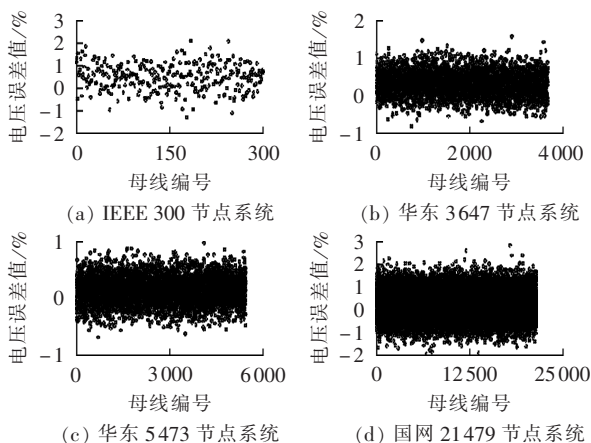


图 4 严重故障状态下电压误差散点图

Fig.4 Scatter diagrams of voltage error for serious fault

由图 4 可知:严重故障状态下,2 种算法的计算结果极为接近,多数节点电压误差在 1%之内,极少数超过 2%,这也验证了该算法的准确性和对大电力系统的适用性。

5 结论

由以上分析可知,本文提出的新型算法降低了网络矩阵的维数,并且在迭代过程中部分节点数据可以退出修正计算,相当于进一步降低了网络维数,显著提高了计算速度。虽然采取弱收敛条件作为算法的结束条件会降低算法的精确度,但求取结果依然在误差范围内,并且该算法较高斯法和牛顿法具有更高的收敛性。另外,本文算法以电压变化量作为迭代变量,当电网结构变化前后潮流变化不是太大时,网络部分节点电压变化量较小,近似为 0,在迭代过程中会很快达到精度值停止修正计算,仅仅参与迭代,潮流计算速度优势明显。本文虽然是针对静态安全分析对潮流算法进行改进,但通过算法的分析可知,

该算法适用于网络结构变化后的潮流计算,并不局限于静态安全分析,因此本文算法具有较好的通用性。

参考文献:

[1] 孙秋野,陈会敏,杨家农,等. 牛顿类潮流计算方法的收敛性分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(13):2196-2200.
SUN Qiuye,CHEN Huimin,YANG Jianong,et al. Analysis on convergence of Newton-like power flow algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(13):2196-2200.

[2] 於益军,刘俊,冯树海,等. 基于开断灵敏度的静态安全分析辅助决策[J]. 中国电力,2013,46(3):53-58.
YU Yijun,LIU Jun,FENG Shuhai,et al. Assistant decision-making for static security analysis based on outage sensitivity[J]. Electric Power,2013,46(3):53-58.

[3] 阳育德,冯彦维,韦化. 基于补偿法的预防性静态安全控制[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):47-54.
YANG Yude,FENG Yanwei,WEI Hua. Preventive static security control based on compensation method[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):47-54.

[4] 艾鹏,张雪霞,王晓茹. 基于补偿算法改进的隐式 Zbus 高斯潮流计算方法[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(21):67-72.
AI Peng,ZHANG Xuexia,WANG Xiaoru. An enhanced implicit Zbus Gauss method based on compensation method for power flow calculation[J]. Power System Protection and Control,2015,43(21):67-72.

[5] 丁平,李亚楼,徐得超,等. 电力系统快速静态安全分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(31):77-82.
DING Ping,LI Yalou,XU Dechao,et al. Improved algorithm of fast static security analysis of power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(31):77-82.

[6] 何洋,洪潮,陈昆薇. 稀疏向量技术在静态安全分析中的应用[J]. 中国电机工程学报,2003,23(1):42-45.
HE Yang,HONG Chao,CHEN Kunwei. Study of sparse vector techniques applied to contingency analysis[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(1):42-45.

[7] 刘怡芳,张步涵,李俊芳,等. 考虑电网静态安全风险的随机潮流计算[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):59-64.
LIU Yifang,ZHANG Buhuan,LI Junfang,et al. Probabilistic load flow algorithm considering static security risk of the power system[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(1):59-64.

[8] 张传成. 概率潮流在静态安全分析中的应用[D]. 北京:华北电力大学,2009.
ZHANG Chuancheng. Application of probabilistic load flow in static security analysis[D]. Beijing:North China Electric Power University,2009.

[9] 董雷,杨以涵,张传成,等. 综合考虑网络结构不确定性的概率潮流计算方法[J]. 电工技术学报,2012,27(1):210-216.
DONG Lei,YANG Yihan,ZHANG Chuancheng,et al. Probabilistic load flow considering network configuration uncertainties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(1):210-216.

[10] 李峰,李虎成,於益军,等. 基于并行计算和数据复用的快速静态安全校核技术[J]. 电力系统自动化,2013,37(14):75-80.
LI Feng,LI Hucheng,YU Yijun,et al. Fast computing technologies for static security checking based on parallel computation and data reuse[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(14):75-80.

- [11] 刘森森,陈为化,江全元. 基于并行计算的电力系统风险评估[J]. 浙江大学学报(工学版),2009,43(3):589-595.
LIU Sensen,CHEN Weihua,JIANG Quanyuan. Risk assessment in power system based on parallel computation[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science),2009,43(3):589-595.
- [12] 黄彦全,肖建,刘兰,等. 基于支路切割方法的电力系统潮流并行协调算法[J]. 电网技术,2006,30(4):21-25.
HUANG Yanquan,XIAO Jian,LIU Lan,et al. A coordinational parallel algorithm for power flow calculation based on branch cutting[J]. Power System Technology,2006,30(4):21-25.
- [13] 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,2007:139-168.
- [14] 代景龙,韦化,鲍海波,等. 基于无迹变换含分布式电源系统的随机潮流[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):86-93.
DAI Jinglong,WEI Hua,BAO Haibo,et al. Stochastic power flow calculation based on unscented transform for power system with distributed generations[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):86-93.
- [15] PENG Hanmei,CAO Yijia,HUANG Xiaoqing. Power flow calculation of islanded microgrids based on BFGS trust region method[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(16):2629-2638.
- [16] 卢志刚,程慧琳,冯磊. 基于支路功率选取的功率扩展潮流计算[J]. 电工技术学报,2013,28(6):208-215.
LU Zhigang,CHENG Huilin,FENG Lei. Extended-power load flow calculation based on selection of branch power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(6):208-215.

作者简介:



王方雨

王方雨(1992—),男,江苏徐州人,硕士,研究方向为电力系统分析与控制(E-mail:18001146577@163.com);

刘文颖(1955—),女,北京人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统分析与控制及电力系统智能调度(E-mail:liuwenyings@sina.com)。

Fast static security calculation based on network partition algorithm

WANG Fangyu¹,LIU Wenying¹,TIAN Hao¹,LIANG Chen²,ZHENG Jingjing²

(1. School of Electrical & Electronic Engineering,North China Electrical Power University,Beijing 102206,China;

2. State Grid Gansu Electric Power Company Electric Power Research Institute,Lanzhou 730050,China)

Abstract: Since multiple network reconfiguration and power-flow calculation should be carried out for each fault in the anticipated fault set during traditional static security analysis,the calculation amount and calculation time increase rapidly along with the expansion of power grid,which makes it impossible to satisfy the demand of grid-wide real-time analysis and warning. An iterative method based on network partitioning algorithm is proposed,which reasonably and quite evenly divides the whole grid into sub-networks to reduce the dimension of network matrix and coordinates the sub-networks via boundary variables to effectively enhance the calculation speed. A weak convergence condition is proposed according to the characteristics of the fault power-flow of static security analysis,which makes the calculation amount decrease rapidly along with the increase of iteration turns. Simulation verifies that,since the proposed convergence condition is easy to satisfy,the proposed method has better convergence.

Key words: network partition algorithm; coordination variable; fault power-flow; modified Newton-Raphson method; weak convergence condition; static security