

文章编号:1000-582X(2006)11-0036-05

基于 ward 等值的分布式潮流计算*

颜伟,何宁

(重庆大学 电气工程学院高电压与电工新技术教育部重点实验室,重庆 400030)

摘要:为了解决数据资源广域分布一体化潮流仿真分析问题,提出了一种基于 ward 等值的分布式潮流算法.该算法采用主从分区原理,将互联系统中的各子区域划分为主区域和从区域,并确定联络节点在不同区域的节点类型,使用 ward 等值原理,求出各分区边界节点的等值注入功率和阻抗的基础上,由主区域到各相邻从区域,依次采用牛顿法进行区域潮流计算,由此修正边界节点的电压和等值注入功率.如此反复迭代,直到一体化潮流收敛.该算法充分利用了 ward 等值对相邻区域的功率、电压和结构信息的全面反映,使一体化潮流计算具有更好的收敛性与收敛精度.通过 IEEE30 节点和实际系统 181 节点的仿真计算,验证了该方法在收敛性和收敛精度方面具有明显优势.

关键词: ward 等值;分布式潮流计算;牛顿法

中图分类号: TM744

文献标识码: A

1 研究背景

众所周知,电力系统具有广域分布特点,其调度和控制采用分级分区方式,即根据电网分布的行政区域、网络的拓扑结构和电气特征等将电网划分成多个子网,各子网的调度和运行由一个调度中心负责.各调度中心拥有并维护所辖电网的详细参数,而对外部网络则常常采用简单的近似或者 ward 等值处理.随着区域电网的联系加强,这种简单的近似常常带来很大的误差,严重影响了互联系统的安全稳定分析和区域电网的运行调度.因此,研究分布式潮流算法以满足互联系统一体化仿真分析的需要具有重要的研究意义.

分布式潮流算法以解决多区域互联系统一体化潮流问题为目的,它强调的是各区域数据资源相互独立,以尽可能少的区域电网数据交换来实现各区域潮流的协调分布式计算,最终完成全网的一体化潮流计算,并保证足够的收敛精度和速度.解决多区域电网一体化潮流问题还有另外一个途径,即实时收集各区域电网的所有数据,然后进行数据资源集中的潮流计算.虽然潮流的集中计算没有问题,但会增加大量数据网络传输的巨大负担.而且随着电力市场的发展,各区域电网的实时数据可能是具有重大商业价值的保密资源,因

而不同区域电网可能不愿完全共享其实时数据.显然,分布式潮流算法是解决多区域互联系统一体化潮流问题的有效方法.

在计算机水平较差的时期,为满足大规模电力系统潮流计算在线应用的需要,并行潮流算法得到了深入的研究,产生了许多快速并行潮流算法,如多重因子化法^[1]、W 矩阵法^[2]、稀疏矢量法^[3]等等.理论上讲,并行算法也是分布式算法.但这些方法都基于集中数据资源,不能直接用于解决数据资源分布的潮流问题.近年来,如何解决数据资源独立的分布式算法得到了广泛的关注,提出了分布式潮流算法^[4-5]、无功优化算法^[6-7]等等.其中,文献[4]提出了一种发输配全局潮流算法,把分区边界节点看为广义负荷或广义电源节点,进行分布式并行计算.该方法对解决单边界联络节点的互联系统潮流问题比较有效,而难以处理具有多边界联络节点的密切联系的互联系统潮流问题.文献[5]提出了一种分解协调算法,可以对网络进行任意分区并处理任意联结的互联子系统.它利用子系统之间联络线两端节点的电压,来修正各子系统的外边界节点等值注入功率,并进行子系统潮流的协调迭代,最终实现全网的一体化潮流计算.以上潮流方法都只利用了边界节点的电压信息,不能充分反映外部网络结

* 收稿日期:2006-06-13

基金项目:国家自然科学基金项目(50577073)

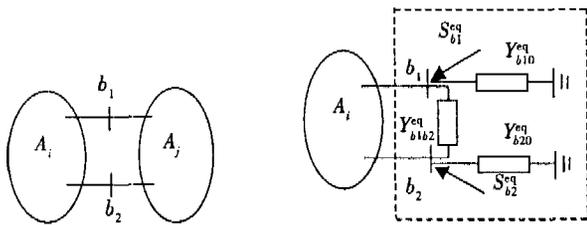
作者简介:颜伟(1968-),男,四川成都人,重庆大学副教授,博士后,主要从事电力系统运行与控制的研究.

构、负荷和电源的影响, 因此往往存在迭代次数较多、收敛精度不够高的问题。

笔者提出了一种基于 ward 等值的分布式潮流算法。ward 等值是一种常用的外部系统等值方法, 尽管该方法也是对外部系统的近似等值, 不能完全反映外部系统的真实影响, 但它可以在一定程度上全面反映外部网络结构、负荷和电源对内部系统的影响, 因而可以克服现有方法只利用边界节点电压信息不足的问题。笔者方法首先采用主从分区原理, 将互联系统中的各子区域划分成主区域和从区域, 并根据联络节点的不同区域归属, 确定其节点类型。其次, 采用 ward 等值原理, 对相邻区域进行 ward 等值, 确定边界节点的等值注入功率和等值阻抗。最后, 以主区域到各相邻从区域, 依次采用牛顿法进行区域潮流计算, 确定并修正边界节点的电压和等值注入功率。如此反复迭代, 直到一体化潮流收敛。

2 ward 等值

设有一个两区域的互联电力系统, 其区域间的联络关系如图 1(a) 所示。其中, 子集 A_i 表示区域 i 的节点集合, 包括 n 个节点; 子集 A_j 表示为区域 j 的节点集合, 包括 m 个节点; 子集 B 表示为连接 A_i 和 A_j 的边界节点集合, 包括 h 个节点, 图中 $B = \{b_1, b_2\}$ 。



(a) 两区域互联系统 (b) A_i 的 ward 等值示意图

图 1 两互联系统 ward 等值示意图

当 A_j 作为 A_i 的外部系统时, 由 ward 等值^[8] 可以得出:

$$S_B^{eq} = -\text{diag}[U_B] \hat{Y}_{BA_j} \hat{Y}_{A_j A_j}^{-1} \left(\frac{S_{A_j}}{U_{A_j}} \right), \quad (1)$$

$$Y^{eq} = [Y_{BB} - Y_{BA_j} Y_{A_j A_j}^{-1} Y_{A_j B}]. \quad (2)$$

式(1)、(2)中, 上标 \wedge 表示取共轭, U_B 是 $h \times 1$ 阶, 为所有边界节点的电压向量; U_{A_j} 是 $m \times 1$ 阶, 为区域 A_j 中所有节点的电压向量; Y_{BA_j} 是 $h \times m$ 阶, 为边界节点与区域 A_j 中节点之间的互导纳; Y_{BB} 是 $h \times h$ 阶, 为边界节点的导纳矩阵; $Y_{A_j A_j}$ 是 $m \times m$ 阶, 为区域 A_j 中节点的导纳矩阵; S_{A_j} 是 $m \times 1$ 阶, 为区域 A_j 各节点的注入功率; $Y_{A_j B}$ 是 $m \times h$ 阶, 为区域 A_j 中节点与边界节点的导纳矩阵; Y^{eq} 表示边界节点的外部网络等值导纳矩阵,

由边界节点的自导纳与其之间的互导纳组成; S_B^{eq} 表示外部网络在边界点的等值注入功率。

当边界点为 2 个节点时, 区域 A_j 的 ward 等值物理模型如图 1(b) 虚线框中等值网络所示, 包括边界节点之间的等值支路导纳 $Y_{b_1 b_2}^{eq}$ 和边界节点的等值对地导纳 $Y_{b_1 i_0}^{eq}, Y_{b_2 i_0}^{eq}$ 、注入功率 $S_{b_1}^{eq}, S_{b_2}^{eq}$; 若区域 A_j 中, 边界节点 b_1 和 b_2 之间没有电气通路, 则等值支路导纳 $Y_{b_1 b_2}^{eq}$ 为 0。当边界节点仅有一个节点 b_1 时, 则 A_j 的 ward 等值物理模型仅包括该节点的对地支路 $Y_{b_1 i_0}^{eq}$ 和注入功率 $S_{b_1}^{eq}$; 当边界节点为 3 个及其以上时, 可以看作是多个双边界节点组合, 其外部网络的 ward 等值物理模型同样可以由各边界节点的等值注入功率、等值对地支路和边界节点之间的等值支路组成。同样, 若任意两个边界节点之间没有电气通路, 则其等值支路导纳同样为 0, 相当于不存在该等值支路。

3 分区的确定和外部系统的等值网络处理

笔者采用主从分区原则进行电网分区。其中, 包含平衡节点的区域为主区域; 不含平衡节点的其它区域为从区域(笔者不考虑多平衡节点系统)。

根据第 2 节的 ward 等值方法, 分区个数不同, 其外网的等值模型处理不同。

当只有 2 个区域时, 双边界节点的外部等值网络如图 1(b) 的虚框内部网络所示。当区域 A_i 作 A_j 为的外部系统时, 可以采用类似的方法, 将其等值为边界节点的注入功率、支路导纳和对地导纳。同样方法, 可处理单边界和多边界节点的外部等值系统。

当有多个从分区时, 从分区之间的等值网络需要合并。下面以图 2(a) 的 2 个从分区为例。其中, A_1 为主分区, A_2 和 A_3 为从分区, B_1, B_2 和 B_3 为各个分区间的边界节点集合。当确定 A_1 的外部等值网络时, 需要同时将 A_2 和 A_3 进行 ward 等值, 相应形成图 2(b) 所示的外部等值网络。由于边界节点 B_3 存在 2 条等值对地支路 and 2 个等值注入功率, 因此需要合并为一条等值对地支路和一个等值注入功率, 如图 2(c), 即:

$$S_{B_3}^{eq} = S_{B_3}^{eq} + S_{B_3}^{eq}, \quad (3)$$

$$Y_{b_{30}}^{eq} = Y_{b_{30}}^{eq} + Y_{b_{30}}^{eq}. \quad (4)$$

如果从区域 A_2 和 A_3 之间没有边界节点 B_3 , 则 A_1 的外网等值模型如图 2(d), 不存在合并问题。

4 边界节点的类型

通过 ward 等值, 形成外部系统的等值网络, 则各子分区可独立进行潮流计算。潮流计算时, 首先需要确

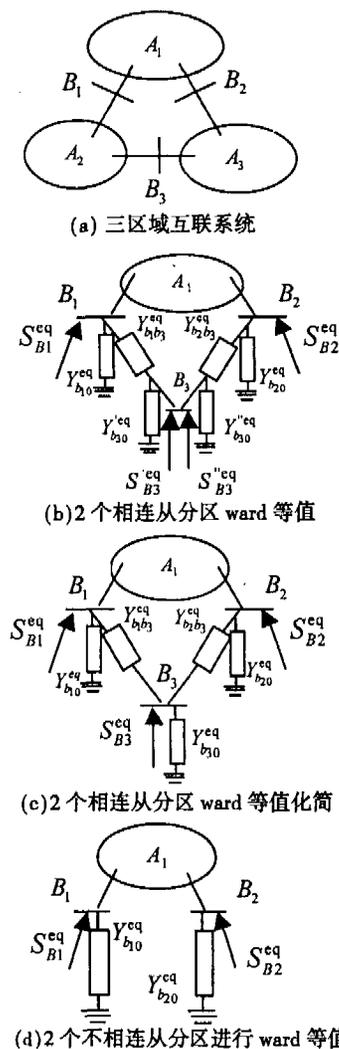


图2 三互联系统的外网等值结构示意图

定各边界节点的类型。

对于主分区,其内部存在平衡节点,因此笔者将所有边界节点定义为PQ节点。

对于从分区,由于缺乏平衡节点,且为了整个系统的相位参考一致性,因此笔者将与主分区相联的任意一个从分区边界节点定义为平衡节点,其它边界节点(包含与主分区或者从分区相联的边界节点)定义为PV节点。当一个从分区不与主分区相联时,则选择与上一级从分区相联的任意一个边界节点为平衡节点,其它边界节点为PV节点。

通过上述节点类型的划分,可以实现全系统电压相位参考的统一性。其中,同时作为主分区PQ节点和从分区平衡节点的关键边界节点,起到相位传递作用。相位传递方式如下:

设关键边界节点在主分区中的电压相位 θ_0 ,关键边界节点所在子系统中有任意节点 i ,其相对电压相位(以关键边界节点为参考)为 δ_i ,则该节点的实际电压

相位(相对全系统平衡点为参考) θ_i 为

$$\theta_i = \theta_0 + \delta_i \quad (5)$$

因此,虽然各子系统都有各自的独立相位参考点,但通过关键边界节点的相位传递,可以确定任意子系统的节点电压实际相位,从而实现全网系统节点电压相位的统一性。

仿真发现,边界节点是否存在注入功率对分区潮流计算的收敛性有影响。为了避免不利影响,笔者对含注入功率的边界节点进行了处理,即在该边界节点所在联络线上,增加一个虚拟节点,来代替原边界节点。

5 分布式潮流计算的迭代步骤

设系统由 N 个分区组成, A_1 为主分区, A_2, \dots, A_N 为从分区, B 为边界节点集合。则分布式潮流计算步骤如下:

1) 根据笔者的分区原则和边界节点类型的处理方法,确定出主从分区及各分区中边界节点的类型。然后根据笔者介绍的外部系统ward等值方法,形成所有分区边界节点的等值导纳矩阵 Y^{eq} 、分区内部节点与边界节点的互导纳矩阵 $Y_{BA_i}^{\text{eq}}$ ($i=1, \dots, N$)、分区内部节点导纳矩阵 $Y_{A_i A_i}^{\text{eq}}$ 。

2) 全网节点电压和注入功率初始化: $U^{(0)} = [U_{A_1}^{(0)}, U_B^{(0)}, U_{A_2}^{(0)}, \dots, U_{A_N}^{(0)}]$, $S^{(0)} = [S_{A_1}^{(0)}, S_B^{(0)}, S_{A_2}^{(0)}, \dots, S_{A_N}^{(0)}]$ 。

3) 根据从分区节点电压,计算节点注入功率并按照公式(1)形成分区边界节点等值注入功率 $S_B^{\text{eq}(0)}$ 。并置迭代次数 $k=0$ 。

4) 采用牛顿法进行主分区潮流计算,确定主分区节点的电压和注入功率,并按照公式(1)计算主分区边界节点的等值注入功率。

5) 将主分区边界节点的电压幅值和等值注入有功功率赋予相应从分区边界节点,从而修正从分区边界节点电压幅值和边界PV节点的有功注入。然后同样采用牛顿法求解从分区潮流,确定从分区节点的电压和注入功率,并按照式(1)计算从分区边界节点的等值注入功率。

6) 根据已确定的主分区和从分区的边界节点电压及其等值注入功率,依次修正并求解待求从分区的边界节点电压及其等值注入功率,直到所有从分区的潮流计算完毕,则完成一次全网分布式潮流迭代计算。然后更新全网节点电压和注入功率,用于下一次分布迭代。

7) 收敛判据:相邻两次迭代中边界节点电压模值

和相角的最大偏差值小于给定的收敛精度 ε , 即 $\max\{|\Delta U_{Bi}|, |\Delta \delta_{Bi}|\} < \varepsilon$ 若满足收敛判据, 则分布式潮流计算收敛, 输出潮流结果. 否则, $k = k + 1$, 转步骤 4).

由以上的算法步骤可以看出, 各分区之间的数据交换只发生在相邻分区之间, 且集中在边界点的等值导纳、等值注入功率和电压上. 其中, 边界点等值导纳只需要计算一次, 分区交换信息后不需要修正. 而边界点电压和等值注入功率则在每次迭代中都需要重新计算和修正. 由于边界节点的数日常常很少, 因此其等值注入功率的修正计算所需很少. 而由于边界节点的等值导纳和等值注入功率可以比较全面地反映外部系统确定的拓扑结构和导纳参数以及变化的节点电压和注入功率对内部系统潮流的影响, 因此尽管各分区交换的信息不多, 但可以比较全面地反应分区潮流变化的影响, 从而可以大幅度提高分区潮流的迭代效率.

6 算 例

笔者以 IEEE30 节点的测试系统和 181 节点的实际系统为例, 对所提分布式潮流算法进行仿真验算. 其中, 181 节点系统是重庆市 220 kV 及以上高压网络的等值系统, 包括 500 kV 变电站 3 座 (变压器 4 台), 220 kV 变电站 28 座 (变压器 44 台), 直接接入 220 kV 的发电厂 4 个 (10 台单元接线发电机组), 500 kV 的外部等值电源 2 个, 变电站中低压侧和部分高压侧等值负荷 73 个, 220 kV 线路 65 条, 500 kV 线路 6 条. 其

中, 200 ~ 500 kV 电网间有一个电磁环网. 计算时, 将 IEEE30 节点系统中调相机节点 5、11 和 13 设为 PQ 节点.

2 个算例的分区信息如表 1. 其中, 第三列数据用 “,” 号隔开, 表示各子分区的内部节点数. IEEE30 节点分为 2 个区域时, 边界节点为 28, 31 (24) (节点 31 是节点 24 的虚拟节点, 后面相同); 分为 3 个区域时, 边界节点为 32 (10), 33 (15), 28, 31 (24).

表 1 试验系统分区情况

算例编号	系统名 - - 分区数	内部节点数	边界节点数
算例 1	IEEE30 - - - 1	30	0
算例 2	IEEE30 - - - 2	21, 8	2
算例 3	IEEE30 - - - 3	15, 8, 6	4
算例 4	181 节点 - - - 2	144, 36	1
算例 5	181 节点 - - - 2	143, 36	2
算例 6	181 节点 - - - 3	15, 29, 132	5
算例 7	181 节点 - - - 4	15, 29, 16, 121	6

基于笔者和文献 [4-5] 的分布式潮流算法, 选择表 1 的测试系统及其相关分区信息, 进行了仿真计算和结果对比. 计算中, 收敛精度都设 $\varepsilon = 0.0001$

6.1 仿真分析

采用笔者分布式潮流算法, 选择表 1 中的 5 个算例进行仿真计算, 算例结果列于表 2.

表 2 基于笔者分布式潮流算法的 5 个算例仿真结果

迭代次数	算例 2	算例 3	算例 5	算例 6	算例 7
全网	3	3	3	4	4
主系统	5, 2, 1	3, 1, 1	5, 2, 1	5, 2, 1, 1	5, 2, 1, 1
从系统	(4, 2, 1)	(2, 1, 1)(4, 3, 1)	4, 2, 1	(4, 3, 1, 1)(3, 4, 2, 1)	(3, 4, 1, 1)(4, 3, 1, 1)(4, 2, 2, 1)

表 2 中的全网迭代次数是指全网分布式潮流迭代次数, 相当于第 5 节中迭代步骤 k 的数值. 从表 2 的第 2 行数据可见, 采用笔者方法, 全网迭代次数较少, 一般都在 5 次以内.

表 2 中的主系统迭代次数是指主区域在每次分布迭代中进行独立潮流计算所需要的牛顿修正方程求解次数. 如表 2 中第 3 行第 2 列元素为 “5, 2, 1”, 表示采用笔者方法算例 2 进行全网 3 次分布迭代后收敛, 每次独立潮流计算的牛顿迭代次数分别为 5、2 和 1 次. 从表 2 的第 3 行数据可见, 第 1 次分布迭代时, 主系统独立潮流计算的牛顿迭代次数较多, 以后的分布迭代, 主系统的牛顿迭代次数逐步减少, 最后一次分布迭代时, 牛顿迭代次数仅为 1.

表 2 中的从系统迭代次数与主系统迭代次数具有

类似意义, 只是当从系统有多个时, 每个子系统的迭代次数用括号分开, 如表第 4 行第 3 列元素 “(2, 1, 1)(4, 3, 1)”, 表示 2 个从系统在 3 次分布迭代时的牛顿迭代次数. 从表 2 的第 4 行数据可见, 子系统独立潮流计算的牛顿迭代次数变化规律同主系统.

综合考察表 2 中主系统与子系统的牛顿迭代次数变化特点, 可以说明采用笔者分布式潮流算法, 不仅具有全网迭代次数较少的优点, 而且还具有子系统独立潮流计算的牛顿迭代次数逐步减少的优点. 其根本原因是笔者算法通过边界节点的等值注入功率和等值导纳可以比较全面地反映外部系统潮流变化对本系统影响, 使子系统每次独立潮流计算的收敛结果接近其下一次独立潮流计算的收敛值, 从而加速子系统独立潮流计算以及全网分布潮流计算的收敛.

6.2 仿真对比

选择表1的算例2、4和5,采用笔者及文献[4-5]的分布式潮流算法进行仿真分析,其算例结果列于表3中。其中,算例2是采用IEEE30节点测试系统;算例4和5是采用181实际系统。2个表中的 ΔV_{MAX} 为最大电压模值差,表示分区与不分区的2个潮流结果中同一节点电压模值之差的最大绝对值。

从表3中算例2的全网迭代次数结果来看,笔者方法的迭代次数明显小于文献[5],而文献[4]甚至不能收敛。从表3中算例2的最大电压模值差结果来看,笔者方法结果与不分区的全网潮流计算结果之间的误差非常小,而文献[5]则存在较大误差。

从表3中算例4、5的全网迭代次数和最大电压模值差结果来看,笔者方法在迭代次数和最大电压误差方面同样具有明显优势。而文献[4]虽然在算例4中采用单边界节点分区时快速收敛了,但误差较大。

以上结果说明,相对文献[4-5]的分布式潮流算法,笔者方法具有迭代次数少和收敛精度高的明显优势。而文献[4]主要是针对单边界节点的分区分布式潮流算法,很难解决多边界节点的分区分布式潮流问题。

表3 基于3种分布式潮流算法的仿真结果对比

方法	算例2		算例4		算例5	
	全网迭代次数	ΔV_{MAX}	全网迭代次数	ΔV_{MAX}	全网迭代次数	ΔV_{MAX}
笔者	5	1.3809×10^{-5}	3	1.405×10^{-8}	4	4.691×10^{-7}
文献[4]	不收敛	—	3	0.0487	不收敛	—
文献[5]	14	0.00135	6	5.327×10^{-4}	8	1.544×10^{-3}

7 结论

基于ward等值原理,笔者提出了一种新颖的分布

式潮流算法。该算法充分利用ward等值对相邻区域功率、电压、结构和导纳信息的全面反映,使子系统的牛顿潮流收敛性更好,使全网一体化潮流计算的迭代次数更少。通过IEEE30节点和181实际系统的仿真计算以及与文献[4-5]的仿真结果对比,验证了笔者方法在收敛性和收敛精度方面具有明显优势。

参考文献:

- [1] SHYAN-LUNG LIN, J E VAN NESS. Parallel Solution of Sparse Algebraic Equations [J]. IEEE Trans on PWRS, 1994, 19(2): 743-749.
- [2] HUANG HS, LU CN. Efficient Storage Scheme and Algorithms for W-matrix Vector Multiplication on Vector Computers [J]. IEEE Trans on PWRS, 1994, 9(2): 1083-1091.
- [3] KAWAH LAU, DANIEL J TYKAVSKY, ANJAN BOSE. Coarse Grain Scheduling in Parallel Triangular Factorization and Solution of Power System Matrices [J]. IEEE Trans on PWRS, 1991, 6(2): 708-714.
- [4] 孙宏斌,张伯明,相年德,等.发输配全局潮流计算[J].电网技术,1999,23(1): 50-53.
- [5] 张海波,张伯明,孙宏斌.基于异步迭代的多区域互联系统动态潮流分解协调计算[J].电力系统自动化,2003,27(24):1-5,9
- [6] 程新功,厉吉文,曹立霞,等.基于电网分区的多目标分布式并行无功优化研究[J].中国电机工程学报,2003,23(10):109-113.
- [7] 张勇军,任震.无功电压动态控制的分布式协同优化[J].中国电机工程学报,2004,24(4): 34-38.
- [8] 诸骏伟.电力系统分析[M].北京:中国电力出版社,1995. 115-124.

Distributed Power Flow Method Based on Ward Equivalent

YAN Wei, HE Ning

(Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Electrical Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: With interconnecting and developing of power system, the problem of power flow computation on dispersed data resource need to be solved. A new distributed computation method of power flow based on Ward equivalent is presented. According to master-slaver splitting principle, multi-area interconnected power system is divided into master-slaver areas. Boundary buses in different areas are defined as different bus-types. Neighborhood areas are equivalent by Ward equivalent principle, and the equivalent injection power and equivalent impedance are worked out. Power flows from master area to slaver areas are solved by Newton method, and the equivalent injection power and equivalent impedance on the boundary are modified by their solutions. The process above repeats until to convergence. The proposed distributed power flow method takes full advantage of the information of power, voltage, network configuration in neighborhood areas, so it is better on convergence and quality of solution. The proposed algorithm is testified by IEEE 14-bus system and a practical 181-bus system.

Key words: ward equivalent; distributed power flow calculation; Newton method