第 43 卷 第 6 期 2019 年 3 月 25 日
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 43 No. 6 Mar. 25, 2019
DOI: 10.7500/AEPS20180515009

广义快速分解潮流计算方法

陈艳波[1]，张 智[1]，徐井强[2]，周 勐[3]，余 锐[4]，凌 亮[4]

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院，新能源电力系统国家重点实验室，北京市 102206；
2. 四川能投高县电力有限公司，四川省宜宾市 645150；3. 中国电力科学研究院有限公司，北京市 100192；
4. 国家电网公司西南分部，四川省成都市 600000)

摘要： 快速分解潮流(FDLF)算法在当今的国内外电网调度控制中心和规划部门得到了广泛应用。在大部分情况下 FDLF 算法具有很高的计算效率，但对于高阻抗比的输电网和配电网，FDLF 法的数学基础不再成立，其收敛性和计算效率均变差，因而 FDLF 无法适用于高阻抗比的输电网和配电网。针对以上问题，文中通过对节点注入有功功率/无功功率进行变换，进而得到类有功注入功率/类无功注入功率，两者具有更好的解耦特性，且这种解耦特性与阻抗比的值无关；在此基础上提出一种广义快速分解潮流(GFDLF)算法。GFDLF 算法只需基于一个前提条件，而传统的 FDLF 算法则需要 3 个前提条件，因此 GFDLF 算法对输电网和配电网(包括高阻抗比网络)均具有良好的适应性。算例仿真验证了所提方法具有良好的收敛性和较高的计算效率。

关键词： 快速分解潮流算法；牛顿-拉夫逊法；配电网；高阻抗比；潮流算法

0 引言

电力系统潮流计算是规划、运行以及控制中最为基础和重要的一种计算。最早提出的潮流算法是高斯-赛德尔(Gauss-Seidel，GS)法和牛顿-拉夫逊(Newton-Raphson，NR)法[1]。NR 法因其具有较好的收敛性而被广泛应用，时至今日仍是优秀的潮流算法。结合电力系统的特点，研究者对潮流算法进行了不断的改进，以提高其收敛性、计算效率和适应性。

文献[2]提出一种稀疏技术，大大提高了潮流计算的效率。文献[3]提出一种 NR 法和拟牛顿法相结合的潮流算法，该算法的迭代次数较少。文献[4]提出一种 NR 法和布罗伊登(Broyden)法相结合的方法，该法的迭代次数较少，兼具 NR 法的快速性和 Broyden 法的超收敛性。文献[5]在每次迭代时对雅可比矩阵中的元素进行调整，提高了算法的收敛速度，扩大了收敛区域。为提高大规模电力系统潮流计算的效率，文献[6-10]进一步对潮流算法进行了改进。

针对病态潮流和无解潮流的情况，文献[11]依据病态特征建立基于内点法最优潮流的病态潮流和无解潮流的自动调整模型，实现大电网运行方式调整潮流计算。文献[12]提出一种带自适应阻尼因子的方法来提高潮流计算的收敛性，具有较强的适应能力。

针对输电网的特点，文献[13-15]提出了快速分解潮流(fast decoupled load flow，FDLF)算法。FDLF 对于输电网(特别是高压输电网络)有较好的收敛性和较高的计算效率，同时占用的内存也较小。文献[16]提出一种高斯-快速解耦潮流算法，收敛性较好，但当系统参数或运行方式违反了有功功率和无功功率的解耦条件时，FDLF 法的效率将会大幅度降低甚至不收敛。

针对高阻抗比的潮流计算问题，国内外的研究人员已开展了相关研究[17-23]，其基本思想可概括为对潮流计算过程中的解耦方式和修正方程进行改进，以增强对高阻抗比系统的适应性，从而提高收敛性和计算效率。

以上研究做了很有意义的工作。但在解决传统 FDLF 的局限性方面仍显不足。为此，本文介绍 2017 年提出的发明专利——一种广义快速分解潮流方法[24]，此法通过对节点注入功率进行变换，以期获得与阻抗比无关的解耦特性；在此基础上提出一种广义快速分解潮流(generalized fast decoupled load flow，GFDLF)算法。GFDLF 模型具有如下特点：①对 PQ 节点的有功功率/无功功率进行变换，

收稿日期：2018-05-15；修回日期：2018-09-11。
上网日期：2019-01-02。
国家自然科学基金资助项目(51777067)；新能源电力系统国家重点实验室开放课题研究项目(LAPS18003)。

可变为类有功功率/类无功功率，其在高阻抗比下亦有较好的解耦特性；②对 PV 节点的有功功率进行特殊变换，从而使得其使用条件不受阻抗比的影响。以上特点保证了 GFDLF 对输电网和配电网(包括高阻抗比网络)均具有良好的适应性。

1　已有 NR 法和 FDLF 算法概述

1.1　NR 法概述

在极坐标系下，NR 法的修正方程可描述为[25]：

$$\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{P}\\ \Delta\boldsymbol{Q}\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}\boldsymbol{H} & \boldsymbol{N}\\ \boldsymbol{M} & \boldsymbol{L}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\boldsymbol{\theta}\\ \dfrac{\Delta\boldsymbol{v}}{\boldsymbol{v}}\end{bmatrix}\tag{1}$$

式中：$\Delta\boldsymbol{P}$ 为有功不平衡量；$\Delta\boldsymbol{Q}$ 为无功不平衡量；$\Delta\boldsymbol{\theta}$ 为相角的修正值；$\Delta\boldsymbol{v}$ 为电压的修正值；$\boldsymbol{v}$ 为电压幅值；$\boldsymbol{G}+\mathrm{j}\boldsymbol{B}$ 为系统的节点导纳矩阵；$\boldsymbol{H}=\partial\Delta\boldsymbol{P}/\partial\boldsymbol{\theta}$；$\boldsymbol{N}=\boldsymbol{v}\partial\Delta\boldsymbol{P}/\partial\boldsymbol{v}$；$\boldsymbol{M}=\partial\Delta\boldsymbol{Q}/\partial\boldsymbol{\theta}$；$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{v}\partial\Delta\boldsymbol{Q}/\partial\boldsymbol{v}$。

1.2　FDLF 算法概述

对 NR 法的修正方程，假定在平启动运行方式下(即所有母线的电压幅值都为 1.0(标幺值)，所有相角都为 0 rad)，由式(1)可得定雅可比矩阵潮流(fixed Jacobian load flow，FJLF)算法的修正方程为：

$$\begin{bmatrix}\dfrac{\Delta\boldsymbol{P}}{\boldsymbol{v}}\\ \dfrac{\Delta\boldsymbol{Q}}{\boldsymbol{v}}\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}' & -\boldsymbol{G}'\\ \boldsymbol{G}'' & \boldsymbol{B}''\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{v}\Delta\boldsymbol{\theta}\\ \Delta\boldsymbol{v}\end{bmatrix}\tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{B}'$，$\boldsymbol{G}'$，$\boldsymbol{G}''$，$\boldsymbol{B}''$为 $\boldsymbol{G}+\mathrm{j}\boldsymbol{B}$ 对应的子矩阵。

为进一步提高计算效率，根据定雅可比矩阵的特点，研究者在以下三点假设的基础上提出了 FDLF 算法：①假设系统运行时处于平启动运行状态附近；②阻抗比非常小；③有功功率/无功功率仅用于迭代电压相角/幅值，即忽略 $\boldsymbol{G}'$ 和 $\boldsymbol{G}''$。在以上假设下，可得到 FDLF 的两个解耦修正方程：

$$\frac{\Delta\boldsymbol{P}}{\boldsymbol{v}}=-\boldsymbol{B}'\boldsymbol{v}\Delta\boldsymbol{\theta}\tag{3}$$

$$\frac{\Delta\boldsymbol{Q}}{\boldsymbol{v}}=-\boldsymbol{B}''\Delta\boldsymbol{v}\tag{4}$$

在以上雅可比矩阵中，对支路参数做进一步的简化，可得到所谓的 XB 型或 BX 型的 FDLF。

显然，FDLF 算法存在以下特点：①对于输电网(特别是高压输电网)，FDLF 算法的前提条件近似满足，故 FDLF 算法对输电网(特别是高压输电网)具有良好的适应性，表现出很好的收敛性和很高的计算效率；而当网络参数(如高阻抗比网络)或系统运行条件不满足解耦条件时，FDLF 算法的收敛性变差甚至不收敛。

2　GFDLF 建模

2.1　改进思路

显然，FDLF 算法的局限性源于其 3 个前提条件。若能对节点注入有功功率/无功功率进行适当变换，使得变换后的有功功率/无功功率的解耦不依赖于 3 个前提条件或所依赖的前提条件减少的话，则 FDLF 对不同参数或运行方式的系统将具有广泛的适应性。

为此，以下进行 GFDLF 建模时，仅基于平启动运行方式这一个假设条件。

2.2　节点注入功率变换

2.2.1　PQ 节点注入有功功率/无功功率的变换

对于 PQ 节点，有功功率和无功功率成对出现。此时，可对节点注入有功功率/无功功率进行变换，得到类有功功率/类无功功率，实现广义解耦。具体方法为：对于节点 i 的 P_i 和 Q_i，根据式(2)定雅可比矩阵的 NR 法的修正方程，取出 P_i 和 Q_i 对应的修正方程行，引入变换矩阵 $\boldsymbol{T}_i=\begin{bmatrix}\cos\alpha_i & -\sin\alpha_i\\ \sin\alpha_i & \cos\alpha_i\end{bmatrix}$(其中 α_i 为待求参数)，用矩阵 $\boldsymbol{T}_i$ 左乘之，得到：

$$\begin{bmatrix}\dfrac{\Delta P_i\cos\alpha_i-\Delta Q_i\sin\alpha_i}{v_i}\\ \dfrac{\Delta P_i\sin\alpha_i+\Delta Q_i\cos\alpha_i}{v_i}\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}_i'\cos\alpha_i-\boldsymbol{G}_i''\sin\alpha_i & -\boldsymbol{G}_i'\cos\alpha_i-\boldsymbol{B}_i''\sin\alpha_i\\ \boldsymbol{B}_i'\sin\alpha_i+\boldsymbol{G}_i''\cos\alpha_i & -\boldsymbol{G}_i'\sin\alpha_i+\boldsymbol{B}_i''\cos\alpha_i\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\boldsymbol{v}\Delta\boldsymbol{\theta}\\ \Delta\boldsymbol{v}\end{bmatrix}\tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{B}_i'$，$\boldsymbol{G}_i'$，$\boldsymbol{G}_i''$，$\boldsymbol{B}_i''$分别为 $\boldsymbol{B}'$，$\boldsymbol{G}'$，$\boldsymbol{G}''$，$\boldsymbol{B}''$中对应于 P_i 和 Q_i 的行向量。

为保证注入有功功率/无功功率有较好的解耦特性，式(5)中非对角元 $-\boldsymbol{G}_i'\cos\alpha_i-\boldsymbol{B}_i''\sin\alpha_i$，$\boldsymbol{B}_i'\sin\alpha_i+\boldsymbol{G}_i''\cos\alpha_i$ 需要近似为 $\boldsymbol{0}$。因此，α_i 需满足 $\cos\alpha_i=B_{ii}/\sqrt{G_{ii}^2+B_{ii}^2}$，$\sin\alpha_i=-G_{ii}/\sqrt{G_{ii}^2+B_{ii}^2}$。具体证明过程见附录 A。

将 $\cos\alpha_i$ 和 $\sin\alpha_i$ 代回式(5)，得到 GFDLF 中对应于 PQ 节点的 P_i 和 Q_i 的修正方程为：

$$\begin{bmatrix}\dfrac{\Delta P_i+\dfrac{G_{ii}}{B_{ii}}\Delta Q_i}{v_i} & \dfrac{-\dfrac{G_{ii}}{B_{ii}}\Delta P_i+\Delta Q_i}{v_i}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}=-\begin{bmatrix}\boldsymbol{B}_i'+\dfrac{G_{ii}}{B_{ii}}\boldsymbol{G}_i'' & 0\\ 0 & \dfrac{G_{ii}}{B_{ii}}\boldsymbol{G}_i'+\boldsymbol{B}_i''\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{v}\Delta\boldsymbol{\theta}\\ \Delta\boldsymbol{v}\end{bmatrix}\tag{6}$$

式中：$\Delta P_i + \Delta Q_i G_{ii}/B_{ii}$ 可以看作类有功注入量，$-\Delta P_i G_{ii}/B_{ii} + \Delta Q_i$ 可以看作类无功注入量。由以上推导过程可知，类有功注入量和类无功注入量具有较好的解耦特性，且这种解耦特性与阻抗比无关。

2.2.2　*PV* 节点注入有功功率的变换

对 *PV* 节点，只有节点注入有功功率给定，不能采用 2.2.1 节中 *PQ* 节点的变换方法，这里采用其他变换方式。将式(2)展开得到：

$$\frac{\Delta \boldsymbol{P}}{\boldsymbol{v}} = -\boldsymbol{B}'\boldsymbol{v}\Delta\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{G}'\Delta\boldsymbol{v} \tag{7}$$

将 *PV* 节点对应的 $\boldsymbol{G}'\Delta\boldsymbol{v}$ 移到等式左边可得到：

$$\frac{\Delta \boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}}{\boldsymbol{v}_{\mathrm{G}}} - \boldsymbol{G}_{\mathrm{G}}'\Delta\boldsymbol{v} = -\boldsymbol{B}_{\mathrm{G}}'\boldsymbol{v}\Delta\boldsymbol{\theta} \tag{8}$$

由式(8)可知，可将 $\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}/\boldsymbol{v}_{\mathrm{G}} - \boldsymbol{G}_{\mathrm{G}}'\Delta\boldsymbol{v}$ 看作 *PV* 节点注入有功功率变换后的类有功功率。$\boldsymbol{B}_{\mathrm{G}}'$ 和 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{G}}'$ 分别为 $\boldsymbol{B}'$ 和 $\boldsymbol{G}'$ 中 *PV* 节点对应的行向量；$\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}$ 和 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{G}}$ 分别为 $\Delta\boldsymbol{P}$ 和 $\boldsymbol{v}$ 中 *PV* 节点对应的行向量。

需要指出的是：在实际的迭代计算中，$\Delta\boldsymbol{v}$ 未知，其第 $k+1$ 迭代计算中的数值可采用第 k 次迭代后的数值来代替。

2.3　GFDLF 的求解过程

利用 GFDLF 的修正方程对状态变量进行求解，解耦后的迭代方程为：

$$\Delta\boldsymbol{\theta}^{(k)} = -\left(\boldsymbol{B}_i' + \frac{G_{ii}}{B_{ii}}\boldsymbol{G}_i''\right)^{-1} \frac{\Delta P_i^{(k)} + \dfrac{G_{ii}}{B_{ii}}\Delta Q_i^{(k)}}{v_i^{(k)}\boldsymbol{v}^{(k)}} \tag{9}$$

$$\Delta\boldsymbol{\theta}^{(k)} = -(\boldsymbol{B}_{\mathrm{G}}')^{-1}\frac{\dfrac{\Delta\boldsymbol{P}_{\mathrm{G}}}{\boldsymbol{v}_{\mathrm{G}}} - \boldsymbol{G}_{\mathrm{G}}'\Delta\boldsymbol{v}}{\boldsymbol{v}^{(k)}} \tag{10}$$

$$\Delta\boldsymbol{v}^{(k)} = -\left(\frac{G_{ii}}{B_{ii}}\boldsymbol{G}_i' + \boldsymbol{B}_i''\right)^{-1}\frac{-\dfrac{G_{ii}}{B_{ii}}\Delta P_i^{(k)} + \Delta Q_i^{(k)}}{v_i^{(k)}} \tag{11}$$

式(9)为对 *PQ* 节点的类有功功率和电压相角的迭代方程，式(10)为对 *PV* 节点的类有功功率和电压相角的迭代方程，式(11)为对 *PQ* 节点类无功功率和电压幅值的迭代方程。注意在每一次迭代计算中，应先进行电压幅值迭代，再进行相角的迭代，以保证式(10)的顺利进行。

GFDLF 的求解步骤如下(流程图见图 1)。

步骤 1：初始化变量 $\boldsymbol{\theta}^{(0)}$ 和 $\boldsymbol{v}^{(0)}$，形成节点导纳矩阵；设置迭代次数 $k_{\max}$，收敛条件为：$\|\Delta\boldsymbol{\theta}\| \leqslant \varepsilon_P$ 和 $\|\Delta\boldsymbol{v}\| \leqslant \varepsilon_Q$。

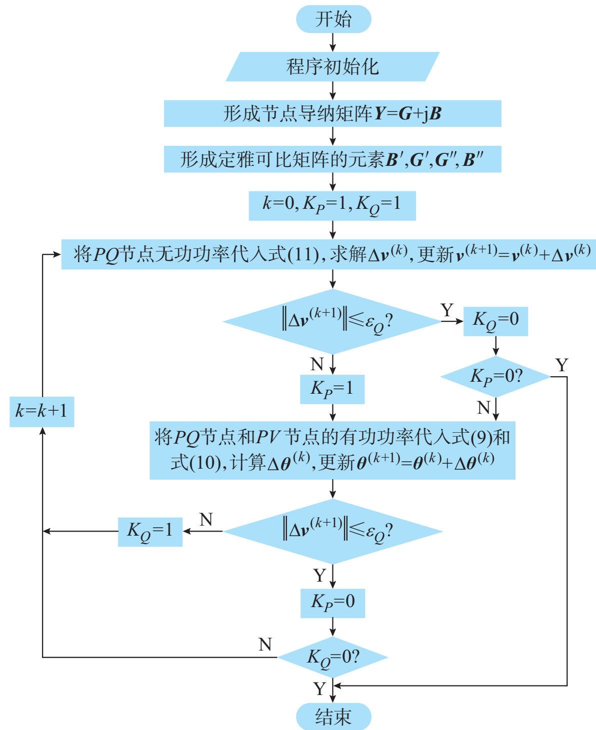

图 1　GFDLF 算法流程图
Fig. 1　Flow chart of GFDLF algorithm

步骤 2：形成定雅可比矩阵中的元素 $\boldsymbol{B}'$，$\boldsymbol{G}'$，$\boldsymbol{G}''$，$\boldsymbol{B}''$。

步骤 3：记 $k=0$，收敛标记 $K_P = K_Q = 1$。

步骤 4：计算 $\Delta\boldsymbol{Q}$，由 GFDLF 迭代方程式(11)，计算 $\Delta\boldsymbol{v}^{(k)}$，并修正 $\boldsymbol{v}^{(k+1)} = \boldsymbol{v}^{(k)} + \Delta\boldsymbol{v}^{(k)}$，判断该步是否收敛，若收敛，则赋值 $K_Q = 0$；若不收敛则 $K_Q = 1$，并进入步骤 6。

步骤 5：计算 $\Delta\boldsymbol{P}$，由迭代方程式(9)和式(11)，计算 $\Delta\boldsymbol{\theta}^{(k)}$，并修正 $\boldsymbol{\theta}^{(k+1)} = \boldsymbol{\theta}^{(k)} + \Delta\boldsymbol{\theta}^{(k)}$，判断是否收敛，若收敛，则赋值 $K_P = 0$；若不收敛则 $K_P = 1$，并进入步骤 6。

步骤 6：判断总体是否收敛，若 $K_P = K_Q = 0$，则计算结束，得到状态变量估计值；若 $K_P = 1$，转到步骤 5；若 $K_Q = 1$，转到步骤 4。

相对于传统 FDLF 算法，本文提出的 GFDLF 算法具有以下优点：①GFDLF 算法只需要基于一个前提条件，而传统的 FDLF 算法则需要 3 个前提条件，因此 GFDLF 算法可更好地适用于不同的电网(包括高阻抗比的输电网和配电网)；②GFDLF 算法中的类有功功率/无功功率相比于传统的 FDLF 算法中的有功功率/无功功率有更好的解耦特性，因而 GFDLF 算法具有更好的收敛性和更高的计算效率。

3　算例分析

为了验证所提出的 GFDLF 的有效性，在 IEEE 标准系统和某实际电网进行测试。算法采用 JAVA 编程，测试环境为 PC 机，CPU 为 Intel (R) Core (TM) i3，主频为 2.40 GHz，内存为 2 GB。

3.1　正常阻抗比下收敛性和计算效率测试

首先，在 IEEE 标准系统和某具有 1 170 个节点的实际电网(用 China 1170 表示)上对本文所提出的 GFDLF 算法进行测试，其中 IEEE 69 节点系统为配电网，在以上系统中阻抗比都是正常值。利用 NR 法、FJLF 算法、FDLF(XB) 算法及本文提出的 GFDLF 算法分别进行潮流计算，以比较以上 4 种潮流算法的收敛性和计算效率。4 种算法的迭代次数和计算时间如表 1 所示。

表 1　正常阻抗比下 4 种算法的迭代次数和计算时间

Table 1　Iteration number and computation time of four algorithms for the system with normal resistance-to-reactance ratio

系统	max R	NR 法		FJLF 算法		FDLF(XB)算法		GFDLF 算法	
		迭代次数	计算时间/ms	迭代次数	计算时间/ms	迭代次数	计算时间/ms	迭代次数	计算时间/ms
IEEE 9	0.23	4	3	7	1	7	0.7	7	0.7
IEEE 14	1.11	4	7	12	3	13	2.0	13	2.0
IEEE 30	1.11	4	35	12	13	14	5.0	13	5.0
IEEE 69	3.36	4	110	5	67	∞	∞	6	16.0
IEEE 300	1.32	5	4 658	12	1 239	25	207.0	12	169.0
China 1170	1.59	5	6 730	27	4 386	∞	∞	27	1 644.0

表 1 中，max R 表示此系统中阻抗比的最大值，即系统最大阻抗比，∞表示算法不收敛。由表 1 可知，对于正常阻抗比的网络，NR 法具有最好的收敛性，迭代次数最少，且不同情况下均能收敛，但其计算效率最低，且其计算效率随着系统规模的增大而显著下降，这是因为 NR 法在每次迭代中都须重新计算雅可比矩阵并进行因子分解和前推回代。FJLF 算法的收敛性仅次于 NR 法，其计算效率优于 NR 法，这是因为 FJLF 算法仅需要在首次迭代中形成雅可比矩阵并进行因子分解即可。FDLF(XB)算法需要的迭代次数随着最大阻抗比的提高而大幅增加；在以上测试系统中，当最大阻抗比大于 1.5 时，FDLF 算法不能有效收敛，此时 FDLF 算法的计算效率显著下降，这是因为对于高阻抗比网络，功率解耦条件不再满足，FDLF 算法的前提不再成立，从而导致 FDLF 算法收敛情况恶化。而本文提出的 GFDLF 算法在所有情况下均能有效收敛，特别是当最大阻抗比大于 1.5 时，仍能收敛，从而证明了 GFDLF 算法中类有功功率和类无功功率具有更好的解耦特性，且这种解耦特性与阻抗比无关。在以上 4 种潮流算法中，在各种阻抗比下，本文提出的 GFDLF 算法的计算效率均最佳，在阻抗比不大时，GFDLF 算法的计算效率与 FDLF 算法的计算效率接近。

3.2　高阻抗比下收敛性和计算效率测试

进一步测试 NR 法、FJLF 算法、FDLF(XB) 算法及 GFDLF 算法在高阻抗比下的性能。在每次测试中，从系统所有的支路中任意选择一条支路，将对应支路的电抗变为原来的一半，然后进行潮流计算，并对每个可能的支路组合都进行测试，然后统计平均迭代次数和计算耗时，测试结果如表 2 所示。

表 2　高阻抗比下 4 种算法的迭代次数和计算时间

Table 2　Iteration number and computation time of four algorithms for the system with high resistance-to-reactance ratio

系统	支路组合总数	max R	NR 法		FJLF 算法		FDLF(XB)算法		GFDLF 算法	
			迭代次数	计算时间/ms	迭代次数	计算时间/ms	迭代次数	计算时间/ms	迭代次数	计算时间/ms
IEEE 9	9	0.46	4	14	8	4	8	2	8	2
IEEE 14	20	2.21	4	16	13	14	14	8	14	8
IEEE 30	41	2.21	4	27	13	23	16	16	14	15
IEEE 69	68	6.72	4	129	6	107	∞	∞	6	25
IEEE 300	411	2.64	5	4 762	12	1 537	∞	∞	12	206
China 1170	1 751	3.20	7	94 225	33	7 799	∞	∞	33	2 076

从表 2 中可看出，在高阻抗比的情况下，FDLF(XB) 的迭代次数显著增加，在一些支路组合中甚至不收敛，而 NR 法、FJLF 算法和 GFDLF 算法在所有的情况下均能可靠收敛。对比表 1 和表 2

可知，当 $\max R$ 增大一倍时，NR 的计算效率下降较多。FDLF(XB)算法的计算效率随着阻抗比的增大也会显著下降。FDLF 算法在正常阻抗比时有较高的计算效率，但当阻抗比较大时，FDLF 算法不收敛。本文提出的 GFDLF 算法在阻抗比不大时，计算效率与 FDLF 算法相当；当阻抗比较大时，GFDLF 算法的计算效率明显高于 FDLF 算法。总体来说，当 $\max R$ 增大一倍时，本文提出的 GFDLF 算法的计算效率仍然最高，GFDLF 算法既具有收敛速度快的优点又能适应不同阻抗比的网络。

3.3　重载潮流下的计算结果

进一步在 IEEE 300 节点系统上测试 NR 法、FJLF 算法、FDLF(XB)算法及本文提出的 GFDLF 算法在重载潮流下的计算性能。将 IEEE 300 节点系统上所有的负荷功率增大 50%，同时将除了平衡节点外的其他发电机节点的功率也增大 50%。

此时，NR 法、FJLF 算法、FDLF(XB)算法及 GFDLF 算法的迭代次数分别为 8，15，∞，15，计算时间分别为 7 610.3，1 989.7，∞，259.9 ms。可见，在重载系统下，在以上 4 种潮流算法中，FDLF(XB)算法不收敛，GFDLF 算法拥有最高的计算效率。从计算精度来看，NR 法、FJLF 算法及 GFDLF 算法这 3 种算法得到的电压幅值精度和相位精度都近似相等，数量级分别为 10^{-5} 和 10^{-4}。这就证明了在重载系统下，本文提出的 GFDLF 算法的估计精度满足要求，且具有最好的收敛性和计算效率。

3.4　与复单位正则化(CPU)变换方法的对比

进一步对 CPU 变换方法[21]与 GFDLF 算法在高阻抗比下的性能进行对比测试。在每次测试中，从系统所有的支路中任意选择一条支路，将对应支路的电抗变为原来的一半，然后进行潮流计算；并对每个可能的支路组合都进行测试，统计平均迭代次数和计算耗时，测试结果分别如附录 B 表 B1 和表 B2 所示。

从附录 B 表 B1 可看出，在高阻抗比的情况下，相较于正常的阻抗比，传统的 FDLF(XB)算法的迭代次数显著增加，在一些支路组合中甚至不收敛，而 NR 法、CPU 变换方法和 GFDLF 算法在所有的情况下均能可靠收敛。GFDLF 算法的收敛性好于 CPU 变换方法。

由附录 B 表 B2 可知，当 $\max R$ 增大一倍时，NR 的计算效率下降较多。FDLF 算法在正常阻抗比时有较高的计算效率，但当阻抗比较大时，FDLF 不收敛。CPU 变化方法在高阻抗比下仍然具有较高的计算效率。本文提出的 GFDLF 算法在阻抗比不大时，计算效率与 FDLF 算法相当；当阻抗比较大时，GFDLF 算法的计算效率明显高于 FDLF 算法，略高于 CPU 变化方法。总体来说，当 $\max R$ 增大一倍时，本文提出的 GFDLF 算法的计算效率仍然最高，GFDLF 算法既具有收敛速度快的优点又能适应不同阻抗比的网络。

4　结语

为解决传统 FDLF 算法的缺点，本文提出一种 GFDLF 算法，此法对 PQ 节点的有功/无功功率进行变换，转换为类有功功率和类无功功率，其在高阻抗比下亦有较好的解耦特性；同时对 PV 节点的有功功率进行变换，从而使得其使用条件不受阻抗比的影响。GFDLF 算法只需要平启动这一前提条件，而传统的 FDLF 算法则需要 3 个前提条件。理论分析和仿真算例均表明，GFDLF 算法对输电网和配电网(包括高阻抗比网络)均具有良好的适应性，表现出更好的收敛性和更高的计算效率，具有良好的工程应用价值。

需要指出的是，配电网潮流常常三相不对称，此时本文提出的方法无法直接使用。论文的下一步工作是将本文方法推广到三相不对称配电网。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx)。

参考文献

[1] TINNEY W F, HART C E. Power flow solution by Newton's method[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967, PAS-86(11): 1449-1460.

[2] TINNEY W F, WALKER J W. Direct solution of sparse network equations by optimally ordered triangular factorization[J]. Proceedings of the IEEE, 1967, 55(11): 1801-1809.

[3] MOURA A A F, MOURA A P. Newton-Raphson on decoupled load flow with constant matrices of conductance and susceptance[C]// 9th IEEE International Conference on Industry Applications, November 8-10, 2010, Sao Paulo, Brazil: 1-6.

[4] YANG Hui, WEN Fushuan, WANG Liping. Newton-Raphson on power flow algorithm and Broyden method in the distribution system[C]// IEEE 2nd International Power and Energy Conference, December 1-3, 2008, Johor Bahru, Malaysia: 1613-1618.

[5] LAGACE P J, VUONG A H, KAMWA I. Improving power flow convergence by Newton Raphson with a Levenberg-Marquardt method[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, USA: 1-6.

[6] 刘洋，周家启，谢开贵，等. 预条件处理 CG 法大规模电力系统潮流计算[J]. 中国电机工程学报，2006，26(7)：89-94.
LIU Yang, ZHOU Jiaqi, XIE Kaigui, et al. The preconditioned

CG method for large scale power flow solution[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 89-94.

[7] 李传栋,房大中,杨金刚,等.大规模电网并行潮流算法[J].电网技术,2008,32(7):34-39.
LI Chuandong, FANG Dazhong, YANG Jingang, et al. New research on parallel power-flow calculation for large-scale power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 34-39.

[8] 谢开贵,张怀勋,胡博,等.大规模电力系统潮流计算的分布式GESP算法[J].电工技术学报,2010,25(6):89-95.
XIE Kaigui, ZHANG Huaixun, HU Bo, et al. Distributed algorithm for power flow of large-scale power systems using the GESP technique[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 89-95.

[9] 李智欢,韩云飞,苏寅生,等.基于节点类型转换的潮流收敛性调整方法[J].电力系统自动化,2015,39(7):188-193.
LI Zhihuan, HAN Yunfei, SU Yinsheng, et al. A convergence adjustment method of power flow based on node type switching [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 188-193.

[10] 唐灿,董树锋,任雪桂,等.用于迭代法潮流计算的改进Jacobi预处理方法[J].电力系统自动化,2018,42(12):81-86. DOI:10.7500/AEPS20170307005.
TANG Can, DONG Shufeng, REN Xuegui, et al. Improved Jacobi pre-treatment method for solving iterative power flow calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 81-86. DOI: 10.7500/AEPS20170307005.

[11] 彭慧敏,李峰,袁虎玲,等.大规模电网运行方式调整潮流计算及病态诊断[J].电力系统自动化,2018,42(3):136-142. DOI:10.7500/AEPS20170406004.
PENG Huimin, LI Feng, YUAN Huling, et al. Power flow calculation and condition diagnosis for operation mode adjustment of large-scale power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 136-142. DOI: 10.7500/AEPS20170406004.

[12] 严正,范翔,赵文恺,等.自适应Levenberg-Marquardt方法提高潮流计算收敛性[J].中国电机工程学报,2015,35(8):1909-1918.
YAN Zheng, FAN Xiang, ZHAO Wenkai, et al. Improving the convergence of power flow calculation by a self-adaptive Levenberg-Marquardt method[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1909-1918.

[13] TYLAVSKY D J, CROUCH P E, JARRIEL L F, et al. The effects of precision and small impedance branches on power flow robustness[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1994, 9(1): 6-14.

[14] STOTT B. Decoupled Newton load flow [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1972, PAS-91 (5): 1955-1957.

[15] STOTT B, ALSAC O. Fast decoupled load flow[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974, PAS-93 (3): 859-869.

[16] 彭谦,胡国新,张利.高斯-快速解耦潮流算法[J].电网技术,2009,33(3):53-56.
PENG Qian, HU Guoxin, ZHANG Li. Gaussian-fast decoupling power flow algorithm[J]. Power Grid Technology, 2009, 33(3): 53-56.

[17] RAJICIC D, BOSE A. A modification to the fast decoupled power flow for networks with high R/X ratios[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 2002, 3(2): 743-746.

[18] WANG L, XIANG P, WANG S, et al. Novel decoupled power flow[J]. IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution, 1990, 137(1): 1-7.

[19] DYLIACCO T E, RANARAO K A. Theoretical study of the convergence of fast decoupled load flow[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, PAS-96(1): 268-275.

[20] DECKMANN S, PIZZOLANTE A, MONTICELLI A, et al. Numerical testing on power system load flow equivalents[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, PAS-99(6): 2292-2300.

[21] TORTELLI O L, LOURENCO E M, GARCIA A V, et al. Fast decoupled power flow to emerging distribution systems via complex pu normalization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1351-1358.

[22] 张树卿,童陆园,洪潮,等.基于线性功率-电压方程的快速潮流计算方法[J].电力自动化设备,2013,33(6):37-41.
ZHANG Shuqing, TONG Luyuan, HONG Chao, et al. Fast power flow calculation based on linear power-voltage equation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 37-41.

[23] 陈醒,卫志农,沈海平,等.基于双解耦的配电网三相不平衡快速潮流算法[J].电力自动化设备,2017,37(10):63-70.
CHEN Xing, WEI Zhinong, SHEN Haiping, et al. Three-phase unbalanced fast power flow calculation algorithm based on double decoupling for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 63-70.

[24] 陈艳波,陈锐智,王若兰. 一种广义快速分解潮流方法:CN201711174527.6[P].2017-11-22.
CHEN Yanbo, CHEN Ruizhi, WANG Ruolan. A generalized fast decoupled load flow method: CN201711174527.6[P]. 2017-11-22.

[25] 张伯明,陈寿孙,严正.高等电力网络分析[M].2版.北京:清华大学出版社,2007.
ZHANG Boming, CHEN Shousun, YAN Zheng. Advanced power network analysis[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.

陈艳波(1982—),男,通信作者,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:电力系统状态估计、信息安全、综合能源系统。E-mail:yanbochen2008@sina.com

张　智(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统优化与分析。

徐井强(1984—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力系统优化与分析。

(编辑　蔡静雯)

Generalized Fast Decoupled Load Flow Algorithm

CHEN Yanbo[1], *ZHANG Zhi*[1], *XU Jingqiang*[2], *ZHOU Meng*[3], *YU Rui*[4], *LING Liang*[4]

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Sichuan Hydropower Group Gaoxian County Power Co. Ltd., Yibin 645150, China;
3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
4. Southwest Branch of State Grid Corporation of China, Chengdu 600000, China)

Abstract: Fast decoupled load flow (FDLF) algorithm has been widely used in the domestic and international power dispatch and control center and planning department. The FDLF algorithm usually has very high computational efficiency. But for the transmission networks and distribution networks with high resistance-to-reactance ratios, the mathematical basis of the FDLF algorithm is no longer satisfied, and its convergence and computational efficiency are poor. So the FDLF algorithm cannot be applied to the transmission networks and distribution networks with high resistance-to-reactance ratios. The above problem is addressed by transforming active/reactive power at buses so that they can be classified as quasi active/reactive power at buses, which have better decoupling characteristics. And this decoupling property is independent of the value of resistance-to-reactance ratio. On this basis, a generalized fast decoupled load flow (GFDLF) algorithm is proposed. The GFDLF algorithm is based on only one assumption, rather than three assumptions used in the conventional FDLF algorithm. As a result, the GFDLF algorithm has good adaptability to both power transmission network and distribution network (including the network with high resistance-to-reactance ratio). Simulation results show the effectiveness and efficiency of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777067) and State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (No. LAPS18003).

Key words: fast decoupled load flow algorithm; Newton-Raphson method; distribution network; high resistance-to-reactance ratio; load flow algorithm