

DOI: 10.7667/PSPC160341

基于坐标旋转变换的配电系统快速解耦潮流计算方法

扈诗扬, 杨萌, 汪芳宗

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 配电系统中各支路的电阻与其电抗的比值较大, 因此, 经典的快速解耦潮流计算方法不适用于配电系统潮流计算。提出了一种坐标旋转变换方法, 并将这种变换方法与经典的隐式 Z_{bus} 高斯方法相结合, 导出了配电系统的解耦潮流计算方法。以 IEEE 33 节点、IEEE 69 节点和一个实际的 145 节点配电系统为例, 对提出的解耦潮流算法进行了测试。结果表明, 所提出的解耦方法不影响经典的隐式 Z_{bus} 高斯方法的收敛性, 因而是一种高效、实用的快速潮流计算方法。

关键词: 潮流计算; 配电系统; 隐式 Z_{bus} 高斯方法; 坐标旋转变换; 快速解耦潮流计算

A fast decoupled load flow method for distribution system via coordinate rotation transformation

HU Shiyang, YANG Meng, WANG Fangzong

(College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In power distribution system, the ratio of resistance and reactance is comparatively high, making the classic fast decoupled load flow method unsuitable for load flow calculation in distribution system anymore. Therefore, a kind of coordinate rotation transformation method is proposed. By combining this transformation method with the classic implicit Z_{bus} Gauss method, the decoupled load flow method is successfully deduced for distribution system. Taking the IEEE 33-bus, IEEE 69-bus, and an actual 145-node distribution system as examples, this paper tests this decoupled load flow method in detail. The results demonstrate that the proposed decoupled method is of high efficiency and practicability since it does not influence the convergence property of classic implicit Z_{bus} Gauss method.

Key words: load flow; distribution system; implicit Z_{bus} Gauss method; coordinate rotation transformation; fast decoupled load flow

0 引言

潮流计算是电力系统分析计算的基本内容, 也是电力系统三大经典计算任务之一。迄今为止, 应用最广的潮流计算方法仍然是牛顿-拉夫逊法(Newton-Raphson Method)^[1-6], 通常简称为牛顿法。对高压输变电网络的潮流计算, Stott 和 Alsac 在经典牛顿潮流计算方法的基础上, 于 1974 年提出了著名的快速解耦潮流计算方法(Fast Decoupled Load Flow Method, FDLF)^[7]。熟知: FDLF 的物理基础主要在于高压输电网络中各支路电阻与其电抗的比值满足 $r/x \ll 1$ 这一条件。由于配电网络中各支路电阻与其电抗的比值 r/x 较大, 通常在 1~3 之间, 因此, FDLF 不适用于配电网潮流计算^[8-9]。

关于配电系统^[10-13]潮流计算, 研究人员已提出了多种多样的算法, 其中比较有代表意义的方法应

该是所谓的前推回推法(Backward-Forward Sweep Method)^[14-15]以及隐式 Z_{bus} 高斯方法(Implicit Z_{bus} Gauss Method)^[16-17]。前推回推法计算格式简单, 计算效率较高, 但经典的前推回推法只适用于放射形配电系统; 与经典的牛顿类计算方法相比较, 隐式 Z_{bus} 高斯方法只需对一个复数形式的常系数矩阵 Y_{bus} 进行一次性稀疏三角分解, 因而其计算效率较高^[18]。

为将 FDLF 应用于配电系统, 文献[19]提出了复数标幺值(Complex Per Unit Normalization, CPUN)的概念, 其主要目的是利用这一概念或体系来解决配电系统中各支路电阻与其电抗的比值 r/x 过大的问题。显然, 文献[19]的工作是很有意义的。

本文提出了一种坐标旋转变换方法, 并利用这一变换方法导出了一种适用于配电系统的快速解耦潮流计算方法, 最后, 利用算例对比分析, 验证了本文方法的实用性和高效性。

1 坐标旋转变换方法

众所周知, 潮流计算主要是采用直角坐标系 (Cartesian Coordinate) 或极坐标系 (Polar Coordinate)。在上述坐标体系下, 电力系统的网络方程可以描述为

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

式中: Y 是电力系统的节点导纳矩阵, $Y \equiv [y_{ij}]$, $i, j \in (1, n)$, 其中 n 为网络节点数, y_{ij} 是支路 $i-j$ 的互导纳; V 是网络节点电压列向量, $V = [v_k]^T$, $k \in (1, n)$; $I \in \mathbb{C}^{n \times 1}$ 是网络节点注入电流列向量。

定义

$$\tilde{V} = \text{diag}(v_k), \quad k \in (1, n) \quad (2)$$

$$S \equiv [s_k]^T = \tilde{V} \times I^* \quad (3)$$

$$s_k = p_k + jq_k, \quad k \in (1, n) \quad (4)$$

式中: $s_k = p_k + jq_k$ 是节点 k 的注入功率, 其中 p_k 和 q_k 分别是有功和无功; $(\bullet)^*$ 表示复数的复共轭。利用上述定义, 可以将方程(1)写成

$$\tilde{V}^* Y V = S^* \quad (5)$$

记

$$y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}, \quad i, j \in (1, n); \quad j \neq i \quad (6)$$

在配电系统潮流计算中, 通常不计或忽略各节点的对地支路。在这种情况下, 节点导纳矩阵的元素满足

$$y_{ii} = G_{ii} + jB_{ii} = -\sum_{j \neq i} y_{ij}, \quad i \in (1, n); \quad j \neq i \quad (7)$$

令

$$\varphi_i = \pi/2 - \tan^{-1}(B_{ii}/G_{ii}), \quad i \in (1, n) \quad (8)$$

$$T(\varphi) = \text{diag}(e^{j\varphi_i}), \quad i \in (1, n) \quad (9)$$

式(8)和式(9)即是本文所提出的坐标旋转变换。

在上述变换下, 依据方程(5)有

$$T^{-1}(\varphi) \tilde{V}^* T(\varphi) Y V = S^* \quad (10)$$

定义

$$\bar{Y} = T(\varphi) Y \equiv [\bar{y}_{ij}] = [\bar{G}_{ij} + j\bar{B}_{ij}], \quad i, j \in (1, n) \quad (11)$$

$$\bar{S} = T^{-1} S \equiv [\bar{s}_k]^T = [\bar{p}_k + j\bar{q}_k]^T, \quad k \in (1, n) \quad (12)$$

则方程(10)可以写成

$$\tilde{V}^* \bar{Y} V = \bar{S}^* \quad (13)$$

将方程(13)与方程(5)进行比较可知: 在分别利用式(11)、式(12)对节点导纳矩阵以及节点注入功率进行变换的情况下, 配电系统的网络方程在形式上保持不变。

很易理解, 上述变换的主要目的是使变换后的

节点导纳矩阵 \bar{Y} 的元素满足

$$|\bar{G}_{ij}|/|\bar{B}_{ij}| \ll 1, \quad i, j \in (1, n) \quad (14)$$

需要注意的是, 经坐标旋转变换后的支路导纳 $\bar{G}_{ij} + j\bar{B}_{ij} \neq \bar{G}_{ji} + j\bar{B}_{ji}$ 。

2 基于隐式 Z_{bus} 高斯方法的快速解耦潮流计算方法

首先, 经典的隐式 Z_{bus} 高斯方法可用方程(15)来描述。

$$V = Y^{-1}(I - Y_{ns} v_s) = -Y^{-1} I_L + v_s e_{n-1} \quad (15)$$

式中: v_s 是配电系统源节点亦即松弛节点的电压, 通常取 $v_s = v_0 = 1$; I_L 是由配电系统各节点的负荷电流所形成的列向量; Y_{ns} 是源节点与其他节点间的互导纳所形成的一个列向量; e_{n-1} 是一个 $(n-1)$ 维的单位列向量。

将式(15)写成迭代格式, 即

$$V_{(k+1)} = -Y^{-1} I_{L(k)} + v_s e_{n-1} \quad (16)$$

在具体的求解过程中, 隐式 Z_{bus} 高斯法不是直接计算 Y^{-1} , 而是利用稀疏三角分解技术对 Y 进行一次性三角分解, 然后通过简单的“前代”(Forward Substitution)及“回代”(Backward Substitution)运算来获得节点电压的更新值, 这也就是“隐式”二字的含义。由于 Y 是一个复数矩阵, 对 Y 进行一次性三角分解的计算量仍然较大。

记

$$I_L = [i_{Li}]^T, \quad i_{Li} = (p_{Li} + jq_{Li})^*/(v_i)^* \quad (17)$$

式中, $p_{Li} + jq_{Li}$, $i \in (1, n-1)$ 是配电系统中各节点的负荷。将本文所提出的旋转变换即方程(11)和方程(12)应用于方程(16)可得

$$V_{(k+1)} = -\bar{Y}^{-1} \bar{I}_{L(k)} + v_s e_{n-1} \quad (18)$$

$$\bar{I}_L = [\bar{i}_{Li}]^T, \quad \bar{i}_{Li} = (\bar{p}_{Li} - j\bar{q}_{Li})/(v_i)^* \quad (19)$$

式中, $\bar{p}_{Li} - j\bar{q}_{Li}$ 即是经坐标旋转变换后的节点负荷。定义

$$\bar{i}_{Li} = (\bar{p}_{Li} - j\bar{q}_{Li})/(v_i)^* \equiv \alpha_i + j\beta_i \quad (20)$$

$$\alpha = [\alpha_i]^T, \quad \beta = [\beta_i]^T \quad (21)$$

则可以将方程(18)写成实数形式, 即

$$\begin{bmatrix} e_{(k+1)} \\ f_{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{B} & -\bar{G} \\ \bar{G} & \bar{B} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \beta^{(k)} \\ -\alpha^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_0 e_{n-1} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (22)$$

因此, 有

$$\bar{Y}^{-1} = \begin{bmatrix} \bar{B} & -\bar{G} \\ \bar{G} & \bar{B} \end{bmatrix}^{-1}, \quad \bar{G} \equiv [\bar{G}_{ij}], \quad \bar{B} \equiv [\bar{B}_{ij}] \quad (23)$$

$$\bar{Y}^{-1} \approx \begin{bmatrix} I & -\bar{B}^{-1}\bar{G} \\ \bar{B}^{-1}\bar{G} & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{B}^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \bar{B}^{-1} \end{bmatrix} \quad (24)$$

若经旋转变换后的节点导纳矩阵满足以下条件:

$$\rho(\bar{B}^{-1}\bar{G}) \ll 1 \quad (25)$$

则有:

$$Y^{-1} \approx \begin{bmatrix} \bar{B}^{-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \bar{B}^{-1} \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中, $\rho(\bullet)$ 表示矩阵的谱半径。在此情况下, 可以将方程(22)写成

$$\begin{cases} \mathbf{e}_{(k+1)} = \bar{B}^{-1}\boldsymbol{\beta}_{(k)} + v_0\mathbf{e}_{n-1} \\ \mathbf{f}_{(k+1)} = -\bar{B}^{-1}\boldsymbol{\alpha}_{(k)} \end{cases} \quad (27)$$

方程式(27)即是基于隐式 Z_{bus} 高斯方法的解耦潮流计算方法。

显然, 与经典的隐式 Z_{bus} 高斯方法相比较, 解耦潮流计算方法(27)只需对一个实数形式的矩阵 \bar{B} 进行一次性三角分解, 因而其计算量较小。

3 数值算例验证结果

如上所述, 本文所提出的解耦潮流计算方法的关键, 就在于所提出的坐标旋转变换能否使方程(25)成立。为此, 本文选取 IEEE 33 节点配电系统^[20]、IEEE 69 节点配电系统^[21]和一个包含 7 个环网的 145 节点实际配电系统^[22]为例, 对所提出的解耦潮流计算方法进行了验证与对比分析。计算中将 IEEE 33 节点和 IEEE 69 节点配电系统的基准值设定为 $S_B = 10 \text{ MVA}$, $V_B = 12.66 \text{ kV}$; 将实际 145 节点配电系统基准值设定为 $S_B = 100 \text{ MVA}$, $V_B = 10.5 \text{ kV}$; 收敛判断统一取为 $\varepsilon = \|\Delta V_k\|_{\infty} \leq 10^{-4}$ 。

表 1 是坐标旋转变换前、后的节点导纳矩阵的变化概况。

表 1 节点导纳矩阵变化概况

Table 1 Changes of the nodal admittance matrix

系统		IEEE 33	IEEE 69	实际 145
变换前	$\max(G_{ij}/B_{ij})$	3.026	3.357	1.714
	$\min(G_{ij}/B_{ij})$	0.302	0.404	0.419
	$\rho(\mathbf{B}^{-1}\mathbf{G})$	3.024	3.357	1.714
变换后	$\max(\bar{G}_{ij}/\bar{B}_{ij})$	0.682	0.721	0.509
	$\min(\bar{G}_{ij}/\bar{B}_{ij})$	0	0	0
	$\rho(\bar{\mathbf{B}}^{-1}\bar{\mathbf{G}})$	0.461	0.498	0.341

从表 1 中可以看出, 各测试系统经坐标旋转变换后的节点导纳矩阵均满足方程式(25)。

图 1 是经典的隐式 Z_{bus} 高斯方法与本文所提出

的解耦潮流计算方法的收敛过程对比曲线图。

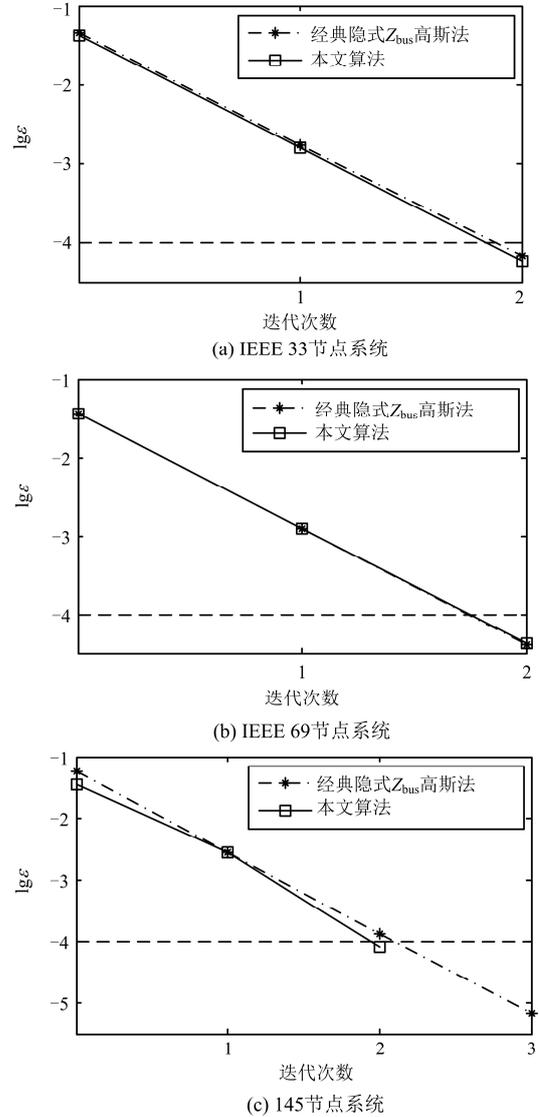


图 1 收敛过程对比曲线

Fig. 1 Comparison of the convergence trajectories

从图 1 中可以看出, 本文所提出的解耦潮流计算方法与经典隐式 Z_{bus} 高斯方法的收敛性大致相当。

对于经典隐式 Z_{bus} 高斯方法与本文方法计算时间的比较结果见表 2, 计算时间为 100 次计算求平均值。由于本文算法是基于经典隐式 Z_{bus} 高斯方法推导得到的, 除坐标旋转变换部分外, 其原始数据处理过程是一样的, 所以, 进行对比的为经典隐式 Z_{bus} 高斯方法迭代部分的计算时间与本文方法迭代和坐标旋转变换两个部分的计算时间之和, 并且迭代过程中常量矩阵都是提前生成的。

从表 2 可以看出, 随着系统规模的增长, 本文方法的计算时间较经典隐式 Z_{bus} 高斯方法有明显的降低。

表 2 经典隐式 Z_{bus} 高斯方法与本文方法计算时间对比
Table 2 Comparison in convergence time between the implicit Z_{bus} Gauss method and the proposed method

系统	经典隐式 Z_{bus} 高斯方法	本文方法
	计算时间/ms	计算时间/ms
IEEE 33 节点	0.87	0.62
IEEE 69 节点	2.03	1.60
145 节点	11.21	7.48

4 结论

本文提出了一种坐标旋转变换方法, 并将该方法与经典隐式 Z_{bus} 高斯方法相结合, 导出了一种适合配电网潮流计算的解耦方法。算例结果表明, 此种解耦方法并不会影响经典隐式 Z_{bus} 高斯方法的收敛性。经过坐标旋转变换, 利用本文的方法进行配电网潮流计算, 只需对一个维数等于节点数的实数矩阵进行一次性三角分解, 而在经典隐式 Z_{bus} 高斯方法的迭代过程中, 通常需要对一个维数等于节点数的复数矩阵进行一次性三角分解, 因此本文方法迭代部分的计算量更小, 又结合具体的时间对比结果可知, 随着系统规模的增大, 本文方法的优势更加明显, 计算速度更快。

综上所述, 本文所提的解耦潮流计算方法是一种高效、实用的快速潮流计算方法。

参考文献

[1] 尹璐, 舒彬, 张璞, 等. 统一潮流控制器在电力系统中的 PSD-BPA 和 MATLAB 联合建模与仿真方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 383-388.
YIN Lu, SHU Bin, ZHANG Pu, et al. A PSD-BPA and MATLAB joint modeling and simulation Method with UPFC for power system flow calculation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 383-388.

[2] 张万月, 陈星莺, 余昆, 等. 基于增广节点支路关联矩阵的前推回代潮流算法[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(12): 62-67.
ZHANG Wanyue, CHEN Xingying, YU Kun, et al. Augmented node branch incidence matrix based Back/Forward Sweep flow calculation[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(12): 62-67.

[3] 郭小璇, 龚仁喜, 鲍海波. 基于随机响应面法考虑随机变量相关性的概率潮流计算[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(2): 104-111.
GUO Xiaoxuan, GONG Renxi, BAO Haibo. Probabilistic load flow calculation considering correlative random variable based on stochastic response surface method[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(2): 104-111.

[4] 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.

[5] 李佩杰, 罗翠云, 白晓清, 等. 一种求解多相混合配电网潮流的扩展序分量法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 15-23.
LI Peijie, LUO Cuiyun, BAI Xiaoqing, et al. An extended sequence components method for solving multiphase power flow in distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 15-23.

[6] 孟晓丽, 唐巍, 刘永梅, 等. 大规模复杂配电网三相不平衡潮流并行计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 45-51.
MENG Xiaoli, TANG Wei, LIU Yongmei, et al. Parallel computing of three-phase unbalanced power flow in large-scale complex distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 45-51.

[7] STOTT B, ALSAC O. Fast decoupled load flow[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & System, 1974, 93(3): 859-869.

[8] 郑欣, 陈文炜, 林舜江, 等. 考虑泵类负荷特性的低压配电网潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 25-31.
ZHENG Xin, CHEN Wenwei, LIN Shunjiang, et al. Power flow calculation of low voltage distribution network including pump loads[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 25-31.

[9] 田芳, 黄彦浩, 史东宇, 等. 电力系统仿真分析技术的发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2152-2163.
TIAN Fang, HUANG Yanhao, SHI Dongyu, et al. Developing trend of power system simulation and analysis technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2152-2163.

[10] 王威, 黄大为. 含可调度分布式电源的配电网综合优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 429-432.
WANG Wei, HUANG Dawei. The coordination optimization of distribution networks with dispatched distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 429-432.

[11] 曹丽鹏, 李志刚, 王国玲, 等. 配电网可靠性的云综合评判法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 418-421.
CAO Lipeng, LI Zhigang, WANG Guoling, et al. Reliability evaluate for distribution network based on cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015,

- 30(S1): 418-421.
- [12] 梁姗姗, 吴军, 刘涤尘, 等. 智能电网技术体系与发展趋势研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(10): 1-5.
LIANG Shanshan, WU Jun, LIU Dichen, et al. Technology system and development trend of smart grid[J]. Shanxi Electric Power, 2015, 43(10): 1-5.
- [13] 张植华, 李健, 林毓, 等. 网格化城市配电网目标网架动态构建方法[J]. 陕西电力, 2015, 43(2): 23-29.
ZHANG Zhihua, LI Jian, LIN Yu, et al. Target grid dynamic construction method for gridding urban distribution network[J]. Shanxi Electric Power, 2015, 43(2): 23-29.
- [14] 胡晓松, 张殷, 谢光彬, 等. 含 PV 节点的配电网合环潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 8-13.
HU Xiaosong, ZHANG Yin, XIE Guangbin, et al. A loop closing power flow calculation algorithm of distribution network with PV nodes[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 8-13.
- [15] SHIRMOHARNADI D, HONG H W, SEMLYEN A, et al. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(2): 753-762.
- [16] 艾鹏, 张雪霞, 王晓茹. 基于补偿算法改进的隐式 Z_{bus} 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 Z_{bus} Gauss method based on compensation method for power flow calculation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 67-72.
- [17] CHEN T H, CHEN M S, HWANG K J, et al. Distribution system power flow analysis a rigid approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(3): 1146-1152.
- [18] 王守相. 现代配电系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 70-72.
- [19] 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.
- [20] 周家南, 苏宏升. 计及负荷电压静态特性的含分布式电源的前推回代潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 26-32.
ZHOU Jianan, SU Hongsheng. Back/forward sweep power flow calculation with distributed generation considering static load characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 26-32.
- [21] BARAN M E, WU F F. Optimal capacitor placement on radial distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(1): 725-734.
- [22] 车仁飞. 配电网潮流计算及重构算法的研究[D]. 济南: 山东大学, 2003.
CHE Renfei. Studies on power flow and network reconfiguration for distribution system[D]. Jinan: Shandong University, 2003.

收稿日期: 2016-03-14; 修回日期: 2016-04-22

作者简介:

扈诗扬(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要从事电力系统分析与计算; E-mail: hsy_zyyx@163.com

杨萌(1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事电力系统分析与计算;

汪芳宗(1966-), 男, 教授, 主要从事电力系统自动化及新能源微电网等方面的研究工作; E-mail: fzwang@ctgu.edu.cn

(编辑 周金梅)