

基于灵敏度-补偿法的电力网络开断潮流新算法

杜正旺¹, 哈恒旭², 宋扬², 段宇菁³, 胡希同²

(1. 胜利油田电力管理总公司, 山东 东营 257000; 2. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049;
3. 沂源县供电公司, 山东 淄博 255049)

摘要: 在对传统断线潮流计算研究基础之上, 提出一种基于灵敏度-补偿法的电力网络开断潮流计算新方法, 以节点注入功率模拟支路开断影响, 根据线路灵敏度迅速计算潮流。支路潮流既是节点电压相角的函数, 又与各节点注入功率有关, 将潮流等式线性化后导出新的计算支路潮流关于节点注入功率的灵敏度公式。通过对传统补偿法进行研究, 推导出简单易求的模拟支路开断节点注入功率公式。经过 CEPRI-36 节点系统仿真验证, 本方法计算结果逼近牛顿-拉夫逊法, 且计算过程无需迭代, 表明具有较高的计算精度和较快的计算速度。

关键词: 电力系统; 过负荷; 潮流计算; 灵敏度; 补偿法

New algorithm based on the sensitivity and the compensation methods for line-outage problem of power network

DU Zheng-wang¹, HA Heng-xu², SONG Yang², DUAN Yu-jing³, HU Xi-tong²

(1. Shengli Oil Field Power Company, Dongying 257000, China;
2. Dept of Electric and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;
3. Yiyuan County Power Supply Company, Zibo 255049, China)

Abstract: This paper proposes a new algorithm based on the sensitivity and the compensation methods after the study of traditional methods. The impact of line-outage is simulated by power into nodes and the branch power is calculated by the use of the sensitivity. Sensitivity formula has been deduced by linearizing the power flow equation based on the fact that the branch active power flow has a relationship with the voltage phase angle and the injected power of nodes. Through the study of traditional compensation method, a new equation simulating power into the node has been deduced. The results of the new algorithm based on the sensitivity and the compensation methods approach that of Newton-Laphson algorithm and iterative calculation isn't required in the process. High accuracy and fast computing speed have been verified by the calculation result of CEPRI-36 test system.

Key words: power system; overload; power flow calculation; sensitivity; compensation

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)16-0103-05

0 引言

大停电事故通常表现为连锁故障, 加强对连锁故障的分析及预防手段对防止大停电的发生具有重要意义。从国内外历次大停电事故的发展过程来看, 连锁故障往往是在初始扰动消除后, 系统因潮流转移引发支路相继开断和相继过载^[1-2]。

实现对连锁事故的预防, 前提是能够快速实现对连锁过载的识别。而连锁过载识别问题的实质是一个在线快速过负荷分析问题。

关于在线快速过负荷分析, 主要集中在两个方面。一方面是如何缩小电网计算规模。电力网络庞大复杂, 发生故障时工作人员不可能对每一条线路进行过负荷分析, 只需找到受故障影响较为严重的

线路进行安全分析即可。另一个方面是对电力系统快速潮流计算的探索。在快速判别出易过载线路后, 需要在线快速进行潮流计算, 以确定线路是否会发生过载。

电力系统潮流计算是研究电力系统稳态运行的一项基本运算, 它根据给定系统的网络结构及运行条件来确定整个系统的运行状态^[3]。关于电力系统快速潮流计算, 在静态安全分析中, 有的称之为安全评价, 其实质是对目标线路进行潮流计算, 以确定该线路是否发生过载。目前常用的在线断线潮流计算方法有直流潮流法, 补偿法和灵敏度法。直流法是以直流潮流算法为基础的预想事故分析方法, 该方法简单, 快速, 但准确度最差。补偿法在实际应用时, 忽略接地支路同时开断时的影响, 计

算过程需要进行迭代运算,计算时间较直流法要长。灵敏度分析方法的优点是计算过程中变量都是由正常潮流计算求出的,不必重新进行计算,所以计算速度较快,但这种方法的计算精度较修改导纳阵后的常规潮流的有所降低。

本文在对各种算法研究基础上,提出一种基于灵敏度-补偿法的电力网络在线开断潮流新算法。该方法利用支路潮流关于各节点注入功率及电压相角的关系,推导出新的灵敏度计算公式,在传统补偿法基础上进一步导出模拟支路开断的节点注入功率计算公式。当系统发生支路开断后,利用线路开断前实时传递到数据中心的各节点电压相角数据,迅速计算得到断线后各支路上的潮流信息。

1 基于灵敏度-补偿法的过负荷分析算法原理

基于灵敏度-补偿法的在线安全分析法原理如图 1 所示。当支路 km 发生开断时,认为该支路未断开,而在节点 k 、 m 处以注入功率增量模拟断线

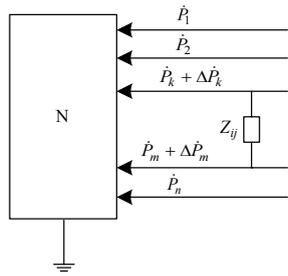


图 1 算法示意图

Fig.1 Schematic diagram of method

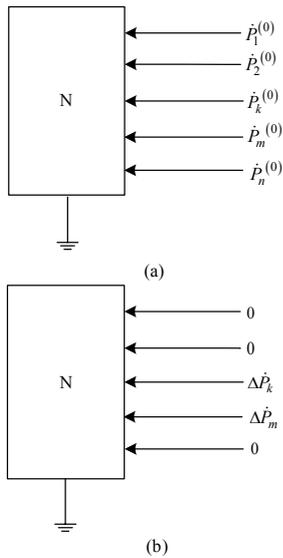


图 2 等效网络示意图

Fig.2 Schematic diagram of equivalent network

的影响,假设断线后在节点 k 、 m 注入功率增量分别为 ΔP_k 、 ΔP_m 。按照叠加原理,可以将图 1 拆分为两个等效网络,如图 2(a)、(b)所示。按照补偿法思想进一步推导出节点注入功率增量 ΔP_k 、 ΔP_m 。将电力系统支路潮流方程按泰勒级数展开,可以得到任意支路 ij 关于节点 k 、 m 注入功率灵敏度,这样我们可以得到断线后支路 ij 的潮流为:

$$P_{ij} = P_{i0} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_k} \cdot \Delta P_{(k,m)} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_m} \cdot (-\Delta P_{(k,m)})$$

1.1 灵敏度公式推导

本文将灵敏度的物理含义叙述如下:当系统内节点 i 注入 1 个单位有功功率时(相应的系统内平衡机减少 1 个单位),支路 L 的有功潮流变化量。

忽略支路接地阻抗,系统支路潮流为

$$P_{ij} = -G_{ij}V_i^2 + G_{ij}V_iV_j \cos\theta_{ij} + B_{ij}V_iV_j \sin\theta_{ij} \quad (1)$$

由式 (1) 可知,系统支路潮流是关于节点电压和相角的函数。因为每条支路上的潮流又与各节点的注入功率有关,我们认为

$$P_{ij}(V_s, \theta_s) = P_{ij}(P_s, Q_s) \quad (2)$$

将式 (2) 左右两边按一阶泰勒级数展开后得到

$$P_{ij}(V_{s0}, \theta_{s0}) + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_s} \Delta V_s + \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_s} \Delta \theta_s = \quad (3)$$

$$P_{ij}(P_{s0}, Q_{s0}) + \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_s} \Delta P_s + \frac{\partial P_{ij}}{\partial Q_s} \Delta Q_s$$

因为

$$P_{ij}(V_{s0}, \theta_{s0}) = P_{ij}(P_{s0}, Q_{s0})$$

所以,等式 (3) 可以表示

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_s} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_s \\ \Delta V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_s} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial Q_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_s \\ \Delta Q_s \end{bmatrix} \quad (4)$$

已知在牛顿-拉夫逊计算方法中,有修正方程

$$\begin{bmatrix} \Delta P_s \\ \Delta Q_s \end{bmatrix} = -J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (5)$$

假设系统中共有 n 个节点,其中有 m 个 PQ 节点,1 个 $V\theta$ 节点, $(n-m-1)$ 个 PV 节点。在传统算法中,式 (5) 包含 $n-1$ 个有功功率方程和 m 个无功功率方程。在本算法中,我们利用线路正常运行时各节点信息,节点电压、相角作为已知量, H 、 N 、 M 、 L 可以实时求得,加上平衡节点,共可

以写出 n 个有功功率方程和 n 个无功功率方程, 因此我们在这里称式(5)中的 \mathbf{J} 为扩大的雅可比矩阵。

将公式(5)代入公式(4)得到

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_s} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_s} V_s \\ \frac{\partial Q_s}{\partial \theta_s} & \frac{\partial Q_s}{\partial V_s} V_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_s \\ \Delta V_s / V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_s} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial Q_s} \\ \frac{\partial Q_s}{\partial P_s} & \frac{\partial Q_s}{\partial Q_s} \end{bmatrix} (-\mathbf{J}) \begin{bmatrix} \Delta \theta_s \\ \Delta V_s / V_s \end{bmatrix} \quad (6)$$

当 $\Delta \theta_s$ 、 $\Delta V_s / V_s$ 任意小时, 等式(6)成立,

也就是说

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_s} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_s} V_s \\ \frac{\partial Q_s}{\partial \theta_s} & \frac{\partial Q_s}{\partial V_s} V_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_s} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial Q_s} \\ \frac{\partial Q_s}{\partial P_s} & \frac{\partial Q_s}{\partial Q_s} \end{bmatrix} * (-\mathbf{J}) \quad (7)$$

将等式两边同时转置, 得到

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_s} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial Q_s} \end{bmatrix} = (-\mathbf{J}^T)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_s} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_s} V_s \end{bmatrix} =$$

$$-\begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^{-T} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_s} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_s} V_s \end{bmatrix} \quad (8)$$

为方便表达, 将式(8)简写为

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_s} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial Q_s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H' & N' \\ M' & L' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_s} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_s} V_s \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中矩阵 $\begin{bmatrix} H' & N' \\ M' & L' \end{bmatrix}$ 对应 $-\begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^{-T}$ 。

由公式(9), 得到

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial P_s} = H' \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_s} + N' \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_s} V_s \quad (10)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial Q_s} = M' \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_s} + L' \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_s} V_s \quad (11)$$

综合考虑在线计算的快速性和精确度要求, 我们忽略节点注入无功功率对支路有功潮流的影响, 只考虑节点注入有功功率对支路潮流的影响, 故支路有功关于节点注入功率的灵敏度公式为

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial P_s} = H' \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_s} + N' \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_s} V_s \quad (12)$$

其中: P_{ij} 是支路潮流; P_s 是节点注入功率; V_s 是节点电压; θ_s 是节点电压相角。

1.2 断线处节点注入功率增量的计算

补偿法的含义是: 在网络支路开断的情况下, 可以认为该支路未被开断, 而在其两端节点处引入

某一待求的功率增量或电流增量来模拟支路的开断^[3]。下面我们利用补偿法来求断线处节点注入功率的增量。

假设支路 km 因故障退出运行, 已知线路 km 的阻抗为 Z_{km} , 故障发生后对系统潮流的影响可以模拟为在节点 k 和节点 m 之间追加一个 Z'_{km} , 且 $Z'_{km} = -Z_{km}$, 令追加支路后在节点 k 、 m 处注入有功功率为 ΔP_k 、 ΔP_m 。如图1所示。

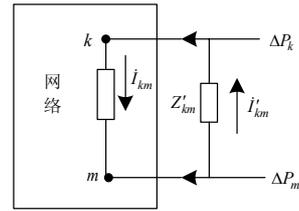


图3 补偿法原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of compensation method

则 $\Delta P_m = -\Delta P_k$

由补偿法原理知, 要求得追加支路上的电流 i'_{km} , 必须先把整个系统看成是支路 Z'_{km} 的等效电源。那么这个电源的空载电压就是

$$\dot{E} = \dot{V}_k^{(0)} - \dot{V}_m^{(0)}$$

电源的等值内阻抗为

$$Z_T = \dot{V}_k^{(km)} - \dot{V}_m^{(km)} = Z_{kk} - Z_{km} - Z_{mk} + Z_{mm}$$

所以

$$i'_{mk} = -\frac{\dot{V}_k^{(0)} - \dot{V}_m^{(0)}}{Z_T + Z'_{km}} = -\frac{\dot{V}_k^{(0)} - \dot{V}_m^{(0)}}{Z_{kk} - Z_{km} - Z_{mk} + Z_{mm} + Z'_{km}}$$

对上式进行如下变换:

$$i'_{mk} = -\frac{\dot{V}_k^{(0)} - \dot{V}_m^{(0)}}{Z_{kk} - Z_{km} - Z_{mk} + Z_{mm} + Z'_{km}} \cdot \frac{Y_{km}}{Y_{km}} = \frac{\dot{I}_{km}}{Y_{km}(Z_{kk} - Z_{km} - Z_{mk} + Z_{mm}) - 1} \quad (13)$$

其中, $Y_{km} = \frac{1}{Z_{km}}$ 。

用节点注入有功功率 \dot{P}'_{mk} 代替节点注入电流 i'_{ij} , 则

$$\dot{P}'_{mk} = -\frac{\dot{P}_{km}}{Y_{km}(Z_{kk} - Z_{km} - Z_{mk} + Z_{mm}) - 1} \quad (14)$$

其中, \dot{P}_{km} 是支路 km 断开前的支路潮流。

这样, 当系统有一条支路(假设为 km 支路)发生开断后, 我们可以迅速得到任意一条支路 l 上的有功潮流为:

$$P_l = P_{l0} + \frac{\partial P_l}{\partial P_k} \cdot \Delta P_{(k,m)} + \frac{\partial P_l}{\partial P_m} \cdot (-\Delta P_{(k,m)}) \quad (15)$$

2 基于灵敏度-补偿法在线潮流计算实施

基于灵敏度-补偿法在线计算分为以下步骤:

1) 系统正常运行条件下, 对各支路及对应节点进行编号, 默认正常运行时的潮流方向为正方向, 调度中心周期性采集计算各节点电压相角信息。

2) 当系统内一条支路突然断开, 从编号矩阵中找到断开支路对应始末端节点 (假设为 k, m), 则任意支路对节点 k, m 的灵敏度由式 (10) 可求。

其中 H', N' 实时求得。 $\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_s}$ 和 $\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_s}$ 矩阵中仅对应

的支路节点对电压相角求导有值, 此时从 H', N' 中调用对应元素进行计算即可。

3) 确定开断节点后, 从网络因子表中提取相关参数, 由式 (14) 计算模拟节点注入功率。 \dot{P}_{km} 是支路 km 断开前的支路潮流, 可根据节点信息实时求得。

4) 根据式 (15), 求得任意支路潮流。

基于灵敏度-补偿法的在线计算流程图如图 4。

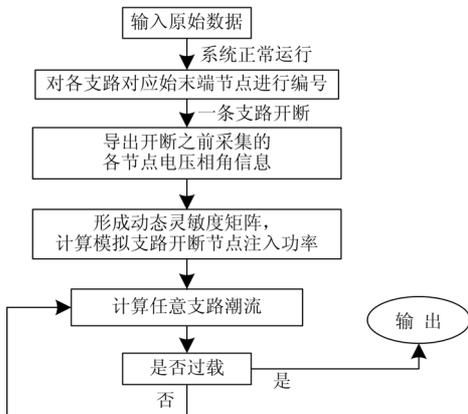


图4 在线计算流程图

Fig.4 Flow chart of on-line calculation

3 仿真实验

为验证本文提出算法的可行性和有效性, 对 CEPRI-36 节点系统进行分析计算, 其系统接线图如图 5 所示。

假设支路 19-21、9-10、20-16 分别发生开断, 按照本文提出的基于灵敏度-补偿法求得各支路潮流计算结果与牛顿-拉夫逊法和快速直流潮流法计算的结果进行比较, 部分支路潮流结果见表 1~3。

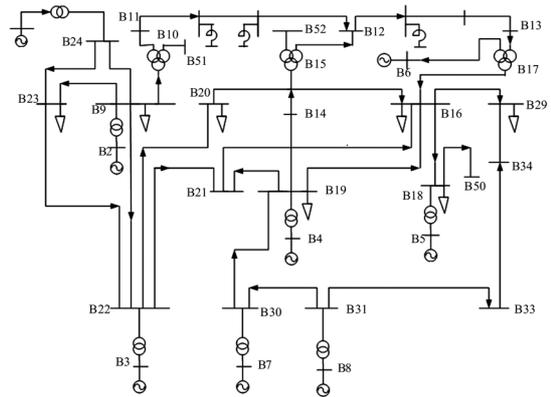


图5 CEPRI-36节点系统接线图

Fig.5 One-line diagram of CEPRI 36-bus system

表1 潮流计算结果比较 (断开支路19-21)

Tab.1 Comparison of power flow algorithm (disconnection of 19-21branch)

支路	开断潮流/pu		
	本文计算结果	牛顿法计算结果	直流潮流法
9-10	3.441 9	3.469 91	3.750 1
9-22	0.907 1	0.921 8	0.771 5
9-23	0.350 7	0.352 84	0.221 2
24-9	2.587 6	2.599 53	2.597 1
10-11	3.475 4	3.469 91	3.749 0
11-25	3.144 0	3.469 91	3.752 5
15-12	1.867 1	1.859 00	1.286 5
26-12	3.634 6	3.431 12	3.709 9
12-27	5.041 9	5.290 11	5.004 3
13-17	5.276 1	5.221 73	4.959 6
28-13	5.235 9	5.221 73	4.951 5
14-15	1.857 4	1.859 00	1.299 3

表2 潮流计算结果比较 (断开支路9-10)

Tab.2 Comparison of power flow algorithm (disconnection of 9-10 branch)

支路	开断潮流/pu		
	本文计算结果	牛顿法计算结果	直流潮流法
19-14	0.868 8	0.863 35	0.921 6
17-16	5.061 8	5.032 56	4.986 0
16-18	0.000 6	0.000 02	0.000 0
19-16	0.953 2	0.955 09	0.954 4
20-16	0.735 9	0.765 06	0.783 1
21-16	0.893 1	0.899 69	0.908 8
16-29	2.618 1	2.556 11	2.558 7
19-21	1.346 7	1.342 20	1.290 3
30-19	2.552 0	2.547 80	2.552 9
22-20	1.498 6	1.531 44	1.564 2
22-21	0.271 1	0.282 12	0.346 0

表3 潮流计算结果比较 (断开支路20-16)

Tab.3 Comparison of power flow algorithm (disconnection of 20-16 branch)

支路	开断潮流/pu		
	本文计算结果	牛顿法计算结果	直流潮流法
15-12	1.280 3	1.269 83	1.146 8
26-12	4.089 1	4.146 44	3.903 2
12-27	5.421 5	5.416 27	5.046 0
13-17	5.369 6	5.342 74	4.962 4
28-13	5.310 4	5.342 74	4.978 7
14-15	1.254 4	1.269 83	1.143 8
19-14	1.282 7	1.275 80	1.148 1
17-16	5.344 9	5.342 74	5.183 5
19-16	1.079 8	1.074 33	0.985 5
21-16	1.195 2	1.185 28	1.010 8
16-29	2.145 2	2.467 72	2.534 1
19-21	0.716 4	0.719 70	1.001 7
30-19	2.455 1	2.448 40	2.522 4
22-20	0.738 2	0.730 54	1.441 8
22-21	1.206 3	1.199 19	0.733 0
23-22	0.613 2	0.607 53	0.738 4
24-23	3.616 6	3.616 63	3.622 4
25-26	4.210 5	4.204 72	3.951 9
27-28	5.438 3	5.416 27	5.045 9

牛顿法是电力系统潮流计算的经典方法,其核心是通过反复形成并求解修正方程式来得到满意的结果。该方法计算精度高,但是反复的迭代运算占用时间长而不适于快速计算。本文以牛顿法计算结果作为计算精度的参考值。

从表格的计算数据可以看到:与常规断线分析中经常使用的直流潮流法相比,本文提出的灵敏度-补偿法的计算结果逼近牛顿法计算结果,计算精度远高于直流潮流法,而且本方法在计算过程中不需要迭代运算,这将省去大量计算时间,从而适于快速计算。对本 CEPRI-36 节点系统进行断线潮流计算用时 0.375 s。

4 结论

基于补偿-灵敏度法的潮流开断分析方法,是通

过节点注入功率来模拟支路开断对其它支路的影响。本文首先根据支路开断前系统各节点的潮流数据,推导了支路关于节点注入功率的灵敏度计算公式,然后利用补偿法原理推导了模拟断线注入节点功率增量的计算公式。整个计算过程所需系统参数可从因子表直接提取而不需再做修改,计算过程不需迭代,通过仿真验证,该方法计算精度高,计算速度快。

参考文献

- [1] 邓慧琼,艾欣,罗啸.电网连锁故障防治策略初探及连锁过载识别方法研究[J].现代电力,2007,24(1):5-11. DENG Hui-qiong, AI Xin, LUO Xiao. Discussion on strategy for cascading outages and identifying method of cascading overload[J]. Modern Power, 2007, 24(1): 5-11.
- [2] 薛禹胜,徐伟,等.关于广域测量系统及广域控制保护系统的评述[J].电力系统自动化,2007,31(15):1-6. XUE Yu-sheng, XU Wei, et al. A review of wide area measurement system and wide area control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 1-6.
- [3] 吴际舜.电力系统静态安全分析[M].上海:上海交通大学出版社,1985.
- [4] 郭金来,等.灵敏度方法及其在电力系统静态安全控制中的应用[J].东北电力技术,1994(12):7-11. GUO Jin-lai, et al. Sensitivity and its application in power system static security control[J]. Northeast Electric Power Technology, 1994(12): 7-11.
- [5] 王锡凡,等.现代电力系统分析[M].北京:科学出版社,2003.
- [6] 罗日成,李卫国.电力系统潮流计算的符号分析方法[J].电网技术,2005,29(10):25-29. LUO Ri-cheng, LI Wei-guo. Symbolic analysis method for load flow calculation of power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 25-29.

收稿日期:2010-01-02; 修回日期:2010-05-25

作者简介:

杜正旺(1965-),男,硕士,高级工程师,从事电力技术及电力科技工作;E-mail: dzwang@slof.com

哈恒旭(1974-),男,博士,研究方向为电力系统及其自动化;

宋扬(1983-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统及其自动化。