

# 基于改进布罗伊登法的交直流潮流计算

曾超, 彭建春, 金灵满, 周元清

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 在分析求解非线性方程组的布罗伊登法和一种改进的布罗伊登法的基础上, 针对交直流混联系统, 运用改进的布罗伊登法, 提出了一种潮流计算的统一迭代法, 设计了算法的具体实现步骤, 并以一个 IEEE9 节点修改系统进行仿真计算, 结果表明本文采用的改进布罗伊登法交直流潮流计算方法有效可行。

**关键词:** 交直流系统; 潮流计算; 改进布罗伊登法

## Integrated AC/DC systems power flow solution using improved Broyden approach

ZENG Chao, PENG Jian-chun, JIN Ling-man, ZHOU Yuan-qing

(College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** This paper analyses Broyden method and improved Broyden method to nonlinear systems. A unified iterative method for AC/DC power flow solution is proposed, based on the improved Broyden method. The implementation of the algorithm is designed. This method is validated by the IEEE 9-bus test system. The result shows that this new method is positive and effective.

**Key words:** AC/DC hybrid power systems; power flow; improved Broyden method

中图分类号: TM711; TM744

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2008)11-0005-04

## 0 引言

随着高压直流输电在我国“西电东送”和全国联网中的投入运行, 开展对直流输电系统计算模型和交直流混联系统运行的研究, 解决交直流混合电网运行中的难题, 对我国电网的安全稳定运行具有越来越重要的意义<sup>[1]</sup>。传统交直流电力系统潮流计算方法主要分为两种: 第一种是统一迭代法<sup>[2-4]</sup>。统一迭代法以极坐标形式下的牛顿法为基础, 将交流系统和直流系统的未知变量联合求解, 收敛特性好, 适应范围广, 但相对复杂, 也很难结合已有的交流潮流解决技巧进行加速求解<sup>[5]</sup>。第二种方法是交替迭代法<sup>[6-9]</sup>, 交流方程和直流方程分别进行迭代求解。交替迭代法比较容易实现, 但是在一些特定情况下交替迭代法存在收敛问题<sup>[10]</sup>, 直流端变量也不能明确地包含在状态向量中。近年来也提出了比如快速分解法修改无功电压迭代矩阵、牛顿法修改雅可比矩阵来考虑交直流系统的耦合, 改进了算法的收敛性。另外, 针对牛顿法的某些不足, 也提出来了利用布罗伊登法来进行交直流潮流计算<sup>[11]</sup>。

本文在分析两端 HDVC 模型工作原理<sup>[12]</sup>的基础上, 运用改进的布罗伊登法进行交直流潮流计算,

以改进潮流计算的快速收敛性和可靠性。

## 1 改进的布罗伊登算法

### 1.1 布罗伊登算法

对于求解非线性方程组  $F(x)=0$ , 牛顿法收敛很快, 但是每一步都要计算  $F'(x^{(k)})$ , 费时且有时计算很困难且计算量大。为了使每步不必计算  $F'(x^{(k)})$  而又保持超线性收敛, 布罗伊登提出了一种有效算法<sup>[13]</sup>。

其迭代过程如下:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - A_k^{-1} F(x^{(k)})$$

$$A_{k+1} = A_k + (q_k - A_k p_k) \frac{p_k^T}{p_k^T p_k}, \quad k=0, 1, \dots$$

其中:  $p_k = x^{(k+1)} - x^{(k)}$ ,  $q_k = F(x^{(k+1)}) - F(x^{(k)})$ , 一般  $A_0$  取  $F(x)$  在初始点  $x^{(0)}$  的雅可比矩阵, 当  $p_k$  即  $x^{(k+1)} - x^{(k)}$  小于一定给定值  $\varepsilon$  时迭代终止。

相比于牛顿法, 该方法避免了每次迭代中都要计算函数  $f$  在当前迭代点的导数以确定一个新方向的缺点, 在实际计算中编程易于实现, 而且在某些情况下, 牛顿法在估算值和真实值相差较远的时候全局收敛性较差。布罗伊登算法具有超线性收敛

特性<sup>[14]</sup>。布罗伊登算法亦可用于交直流混联系统潮流方程的求解。

### 1.2 改进布罗伊登算法

若迭代矩阵严重病态或接近奇异，有可能使布罗伊登算法迭代过程恶性中断，或不能求出指定精度要求的数值解。为解决上述问题，提出了改进布罗伊登算法<sup>[15]</sup>，对布罗伊登迭代过程采用加速技巧，通过对相邻三次迭代的近似向量值进行组合来提高精度，加速迭代过程。

改进布罗伊登算法的计算步骤如下：

(1) 给定初值  $x^{(0)}$  和精度要求  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$ ；

(2) 取初始矩阵  $A_0 = F'(x^{(0)})$ ；

(3) 令  $k=0$ ，计算  $F(x^{(0)})$ ；

(4)  $x^{(k+1)} = x^{(k)} - A_k^{-1}F(x^{(k)})$ ；

(5) 当  $k \geq 1$  时，修正

$$x_i^{(k+1)} = \frac{x_i^{(k-1)}x_i^{(k+1)} - (x_i^{(k)})^2}{x_i^{(k-1)} + x_i^{(k+1)} - 2x_i^{(k)}}, i=1,2,\dots,n;$$

(6) 计算  $F(x^{(k+1)})$ ，检验  $\|F(x^{(k+1)})\| \leq \varepsilon_1$  或

$\|p_k\| \leq \varepsilon_2$  是否成立，成立则输出结果，不成立则转下一步；

$$(7) A_{k+1} = A_k + (q_k - A_k p_k) \frac{p_k^T}{p_k^T p_k};$$

(8)  $k = k + 1$ ，转(4)重新迭代。

其中： $p_k = x^{(k+1)} - x^{(k)}$ ， $q_k = F(x^{(k+1)}) - F(x^{(k)})$ 。

这种方法放宽了初值的限制条件，在利用矩阵奇异值分解的基础上采用了加速技巧，从而大大提高了收敛速度。改进算法加速过程与牛顿法具有相同的收敛特征，且对收敛的迭代法应用加速技巧提高了收敛阶，改善了算法的效率。

## 2 用于潮流计算的换流器模型

图 1 所示为本文采用的简单单极直流输电系统，直流系统的标么基准值选择为： $S_{dcB} = S_B$ ，

$$V_{dcB} = V_B, I_{dcB} = \sqrt{3}I_B。$$

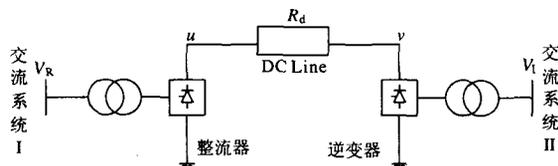


图 1 简单两端直流输电系统

Fig.1 Two-port model of HVDC transmission link

对于上述系统，其稳态方程归纳如下：

$$V_{du} = K_0 T_R V_{tu} \cos \alpha_R - R_{Ru} I_d \quad (1)$$

$$V_{dv} = K_0 T_I V_{tv} \cos \delta_I - R_{Rv} I_d \quad (2)$$

$$P_{du} = V_{du} I_d$$

$$f_1(\alpha_R, V_{tu}, T_R) = P_{du} - V_{du} I_d =$$

$$P_{du} - K_0 T_R V_{tu} I_d \cos \alpha_R + R_{Ru} I_d^2 \quad (3)$$

$$P_{dv} = V_{dv} I_d$$

$$f_2(\delta_I, V_{tv}, T_I) = P_{dv} - V_{dv} I_d =$$

$$P_{dv} - K_0 T_I V_{tv} I_d \cos \delta_I + R_{Rv} I_d^2 \quad (4)$$

$$V_{du} = V_{dv} + R_d I_d \quad (5)$$

$$P_{du} = P_{dv} + R_d I_d^2 \quad (6)$$

$$S_{du} = KK_0 T_R V_{tu} I_d \quad (7)$$

$$S_{dv} = KK_0 T_I V_{tv} I_d \quad (8)$$

$$f_3(\alpha_R, V_{tu}, T_R) = S_{du}^2 - P_{du}^2 - Q_{du}^2 =$$

$$(KK_0 I_d)^2 T_R^2 V_{tu}^2 - P_{du}^2 - Q_{du}^2 \quad (9)$$

$$f_4(\delta_I, V_{tv}, T_I) = S_{dv}^2 - P_{dv}^2 - Q_{dv}^2 =$$

$$(KK_0 I_d)^2 T_I^2 V_{tv}^2 - P_{dv}^2 - Q_{dv}^2 \quad (10)$$

其中：下标 t 表示换流器交流端，下标 R 表示整流器，下标 I 表示逆变器，u，v 表示直流节点，i，j 表示系统一般节点， $T_R$ ， $T_I$  分别表示节点 u 和 v 的换流变压器变比， $\alpha_R$  和  $\delta_I$  分别表示触发角和熄弧角， $V_{du}$  和  $V_{dv}$  分别表示节点 u 和 v 的直流电压， $I_d$  表示节点 u 和 v 之间的直流电流， $S_{du(v)}$ 、 $P_{du(v)}$ 、 $Q_{du(v)}$  分别表示节点 u 和 v 的换流器和变压器消耗的视在功率、有功功率、无功功率， $V_{tu}$  和  $V_{tv}$  分别表示节点 u 和 v 的交流线电压。其中  $K_0 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}$ ， $K = 0.995$ ，

等值换相电阻  $R_t = \frac{3}{\pi} \omega L_c = \frac{3}{\pi} X_c$ 。

## 3 交直流混联系统潮流计算模型

### 3.1 直流端的潮流方程

换流器的稳态特性可以用方程 (3)、(4)、(9)、(10) 来表示，由稳态方程可以看出，把与 HVDC 相连的节点当作一个受控于交流端电压、触发角或熄弧角和换流变压器变比的 PQ 节点。由方程 (6) 可知，给定节点有功功率和无功功率就可以求出直流电流  $I_d$ 。

与传统潮流计算方程式比较，由于换流器稳态方程的引入，交直流混联系统的潮流计算问题还要加入换流器直流电压、控制角和换流变压器变比的计算。

另外，换流器的稳态运行调整应使功率因数尽可能地高，应使整流器的触发角和逆变器的熄弧角尽可能地接近它们的最小约束值。

### 3.2 节点功率方程

按照交流系统中的节点上是否接有换流变压器, 把节点分为直流节点和纯交流节点。换流变压器的一次侧所连接的节点称直流节点, 没有换流变压器与其相连的节点叫纯交流节点。

对于纯交流节点, 其节点功率方程式如下:

$$\Delta P_i = P_{is} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (11)$$

$$\Delta Q_i = Q_{is} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (12)$$

对于直流节点, 其节点功率方程式如下:

$$\Delta P_i = P_{is} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \pm P_d = 0 \quad (13)$$

$$\Delta Q_i = Q_{is} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \pm Q_d = 0 \quad (14)$$

式中的正负号分别对应逆变器和整流器。式(11)、(12)、(13)、(14)共同组成了整个交直流系统的节点功率方程式。

### 3.3 交直流混联潮流计算的雅可比矩阵

交直流混联系统潮流计算方程式雅可比矩阵如式(15)所示:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \\ \Delta D \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} J_1 = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta} & J_2 = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial V_i} & J_3 = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial X_{dc}} \\ J_4 = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta} & J_5 = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial V_i} & J_6 = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial X_{dc}} \\ J_7 = \frac{\partial D}{\partial \theta} & J_8 = \frac{\partial D}{\partial V_i} & J_9 = \frac{\partial D}{\partial X_{dc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V_i / V_i \\ \Delta X_{dc} \end{bmatrix}$$

$$\Delta f = -J \Delta x \quad (15)$$

式中:  $D$  为换流器稳态方程(3)、(4)、(9)、(10),  $\Delta x_{dc}$  为直流端变量,  $\Delta x_{dc} = [\alpha_r \quad \delta_i \quad T_r \quad T_i]$ 。

### 4 基于改进的布罗伊登法潮流计算

从数学角度看, 潮流计算方程式(3)、(4)、(9)、(10)、(11)、(12)、(13)、(14)和传统的潮流方程式本质上都是一组多元非线性代数方程, 因此, 布罗伊登算法和牛顿法一样可以用于交直流混联系统潮流方程的求解。

结合改进布罗伊登算法和交直流混联系统潮流计算模型, 有如下潮流迭代计算步骤:

1) 输入原始数据和形成节点导纳矩阵, 给定潮流变量的迭代初值  $x$  及要求精度  $\varepsilon$ , 令  $k=0$ , 利用式(15)求出雅可比矩阵  $J$ , 取初始矩阵  $A_0 = J$ 。

2) 利用式(3)、(4)、(9)、(10)、(11)、(12)、(13)、(14)计算各类节点的不平衡量  $\Delta f^{(k)}$ 。

3) 校验收敛条件  $\max \{\|\Delta f^{(k)}\|\} \leq \varepsilon$ , 如果收敛, 迭代结束, 输出结果, 不收敛则继续计算

4) 修正潮流变量  $x^{(k+1)} = x^{(k)} - A_k^{-1} \Delta f^{(k)}$ 。

5) 当  $k \geq 1$  时, 修正

$$x_i^{(k+1)} = \frac{x_i^{(k-1)} x_i^{(k+1)} - (x_i^{(k)})^2}{x_i^{(k-1)} + x_i^{(k+1)} - 2x_i^{(k)}}, i = 1, 2, \dots, n。$$

6)  $p_k = x^{(k+1)} - x^{(k)}$ ,  $q_k = \Delta f^{(k+1)} - \Delta f^{(k)}$ ,

$$A_{k+1} = A_k + (q_k - A_k p_k) \frac{p_k^T}{p_k^T p_k}。$$

7)  $k = k + 1$ , 转3)重新迭代。

待求变量的迭代初值采用其估算值, 另外需要注意的是, 为了降低方程式(15)的非线性度, 直流端变量  $\alpha_r$ 、 $\delta_i$  在所涉及的方程中均以  $\cos \alpha_r$ 、 $\cos \delta_i$  的形式出现, 不直接以  $\alpha_r$ 、 $\delta_i$  为待求量, 而以  $\cos \alpha_r$ 、 $\cos \delta_i$  为待求量。

在迭代过程中, 对直流端越界变量的处理方法和传统交流潮流计算类似, 若某变量越界, 则将之限定在所越的界值上<sup>[18]</sup>。另外, 变压器变比在计算中当作连续变量处理。

### 5 算例分析

图2是一个9节点交直流混联系统。

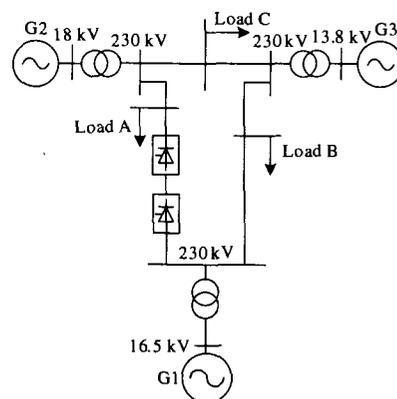


图2 9节点交直流混联系统接线图

Fig.2 9-bus test system with integrated DC link

该系统是对一个 IEEE9 节点测试系统进行修改而得<sup>[17]</sup>。其中将第4节点和第5节点之间的线路用本文所述的直流线路来代替, 其它交流部分的结构保持不变。

直流线路参数如表1所示。

表 1 直流线路参数

Tab.1 Parameters of the DC line

	整流器	逆变器
节点号	4	5
换相电阻/pu	0.0459	0.0518
最小控制角/(°)	7	10
换流变调节范围	±15%	±15%
直流线路等值电阻/pu	0.0001	

直流系统逆变侧定电压控制, 整流侧定功率控制即定电流控制。运算过程中假定发电机节点 1 为平衡节点, 发电机节点 2、3 为 PV 节点, 其余节点均为 PQ 节点。采用改进布罗伊登法潮流计算结果如表 2 及表 3 所示。

表 2 直流端潮流结果

Tab.2 DC power flow results

	整流器	逆变器
控制角/(°)	8.5189	10.0
换流变变比	0.9400	1.15
有功功率/pu	-0.12978	0.12977
无功功率/pu	-0.01804	-0.02355
直流电流/pu	0.1000	

表 3 交流端潮流结果

Tab.3 AC power flow results

节点	P/pu	Q/pu	电压幅值/pu	电压相角/(°)
1	0.7485	0.0640	1.04	0
2	1.6301	0.6272	1.025	2.1418
3	0.8500	0.0053	1.025	0.1859
4	-0.1298	-0.0181	1.0373	-2.2900
5	-1.1207	-0.5238	0.8520	-15.058
6	-0.9000	-0.3000	1.0196	-5.2820
7	-0.0003	-0.0002	0.9917	-3.6100
8	-1.0000	-0.3500	0.9912	-5.5074
9	0	0	1.0257	-2.5283

与牛顿及布罗伊登法的对比如表 4 所示。

表 4 三种潮流算法对比

Tab.4 Contrast of the three power flow methods

算法	牛顿拉夫逊	布罗伊登	改进算法
计算时间	0.1560	0.1880	0.1480
迭代次数	4	28	18

从结果比较可以看出, 相比于布罗伊登法, 改进布罗伊登法同样有效, 而且改进算法的迭代次数从布罗伊登算法的 28 次减少到 18 次, 加速了整个收敛计算的过程, 减少了计算时间。

虽然布罗伊登和改进布罗伊登方法的迭代次数相比于牛顿拉夫逊法要多, 但是其计算过程所需

的函数赋值次数却要远小于牛顿法, 从而其每步计算所花费的计算时间也相对较少, 总体计算时间相近。而当系统大到一定程度时, 研究<sup>[19]</sup>表明布罗伊登法用时将大大小于牛顿法。

## 6 结论

本文针对交直流混联系统, 在分析改进的布罗伊登法的基础上, 将之运用于潮流计算, 提出了一种基于改进的布罗伊登法的潮流统一迭代计算方法, 算例结果验证了本文提出的改进布罗伊登法潮流计算的可行性和有效性, 新方法程序编写也方便而且适用性好。

## 参考文献

- [1] 赵杰. 高压直流输电的前沿技术[J]. 中国电力, 2005, 38(10): 1-6.  
ZHAO Jie. HVDC Transmission Technologies at the Frontier[J]. Electric Power, 2005, 38(10): 1-6.
- [2] Braunagel D A, Kraft L A, Whysong J L. Inclusion of DC Converter and Transmission Equation Directly in a Newton Power Flow[J]. IEEE Trans on PAS, 1976, 95(1): 76-88.
- [3] Arrillaga J, Bodger P. Intergration of HVDC Links with Fast Decoupled Load Flow Solutions[J]. Proc IEE, 1977, 124(5): 463-468.
- [4] Arrillaga J, Smith B. AC-DC Power System Analysis[M]. London: The Institute of Electrical Engineers, 1998.
- [5] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [6] Reeve J, Fahmy G, Stott B. Versatile Load Flow Method for Miltiterminal HVDC Systems[J]. IEEE Trans on PAS, 1977, 96(3): 925-932.
- [7] Fudeh H, Ong C M. A Simple and Efficient AC-DC Load Flow Method for Miltiterminal DC Systems[J]. IEEE Trans on PAS, 1981, 100(11): 4389-4396.
- [8] Arrillaga J, Arnold C P, Harker B J. Computer Modeling of Electrical Power Systems[M]. Newyork: John Wiley and Sons, 1983.
- [9] Smed T, andersson G, Sheble G B, et al. A New Approach to AC/DC Power Flow[J]. IEEE Trans, 1991, 6(3): 1238-1244.
- [10] 徐政. 联于弱交流系统的直流输电特性研究之一: 直流输电的输送能力[J]. 电网技术, 1997, 21(1): 12-16.  
XU Zheng. Characteristics of HVDC Connected to Weak AC Systems Part1 HVDC Transmission Capability[J]. Power System Technology, 1997, 21(1): 12-16.
- [11] Osaloni O, Radman G. Integrated AC/DC Systems Power Flow Solution Using Newton-Raphson and Broyden Approaches[J]. 2005: 225-229.
- [12] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

(下转第 36 页 continued on page 36)

汉宁窗等性能更好的窗,则至少需要2个以上周期,降低了运算速度。但是为了提高运算速度,用单频信号直接采用矩形窗的话,测量精度较差。相比较而言,采用本文提出的方法,在满足测量精度的条件下尽可能地提高了运算速度。

## 5 结论

考虑负频分量影响的插值FFT算法,与普通的矩形窗插值FFT算法相比,减小了泄露误差的影响,可以提高测量精度。与高性能窗相比,由于采样周期数少,因而具有较快计算速度和较好的实时性。考虑负频分量旁瓣影响后,频率修正系数很难直接得出结果,采用三次样条插值法求解,使问题得到了简化,仿真结果表明该方法提高了计算精度,具有实用价值。

## 参考文献

- [1] 祁才君. 数字信号处理技术的算法分析与应用[M]. 北京: 机械工业出版社,2005.
- [2] 丁玉美,高西全. 数字信号处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社,2001.
- [3] Jain Vijay K, Collins Willim L. High-accuracy Analog Measurements via Interpolated FFT[J]. IEEE Trans on IM,1979,28:113-122.
- [4] Grandke Tomas. Interpolation Algorithms for Discrete Fourier Transform of Weighed Signals[J]. IEEE Trans on IM,1983,32:350-355.
- [5] 潘文,钱俞寿,周鄂. 基于加窗差值FFT的电力谐波测量理论(I)窗函数研究[J]. 电工技术学报,1994,9(1): 50-54.
- [6] 潘文,钱俞寿,周鄂. 基于加窗差值FFT的电力谐波测量理论(II)双插值FFT理论[J]. 电工技术学报,1994,9(2): 53-56.
- [7] PAN Wen, QIAN Yu-shou, ZHOU E. Power Harmonics Measurement Based on Windows and Interpolated FFT (I) Study of Windows [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1994, 9(1): 50-54.
- [8] PAN Wen, QIAN Yu-shou, ZHOU E. Power Harmonics Measurement Based on Windows and Interpolated FFT (II) Dualinterpolated FFT Algorithms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,1994, 9(2): 53-56.
- [9] 赵文春,马伟明,胡安. 电机测试中谐波分析的高精度FFT算法[J]. 中国电机工程学报,2001,21(12): 83-87.
- [10] ZHAO Wen-chun, MA Wei-ming, HU An. FFT Algorithm with High Accuracy for Harmonic Analysis in the Electric Machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2001,21(12): 83-87.
- [11] 薛蕙,杨仁刚. 基于FFT的高精度谐波检测算法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(12): 106-110.
- [12] XUE Hui, YANG Ren-gang. Precise Algorithms for Harmonic Analysis Based on FFT Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2002,22(12): 106-110.

收稿日期: 2007-09-21; 修回日期: 2008-01-24

作者简介:

王绍辉(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电能质量监测; E-mail: hnlywsh@163.com

许珉(1956-), 男, 教授, 从事电气设备故障诊断及数字信号处理等方面的研究。

(上接第8页 continued from page 8)

- [13] 李庆扬. 非线性方程组的数值解法[M]. 北京: 科学出版社,1987.
- [14] 黄正达. Broyden方法的收敛条件[J]. 浙江大学学报(理学版),2002,29(1): 25-30.
- [15] HUANG Zheng-da. On the Convergent Condition of the Broyden Method[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2002,29(1): 25-30.
- [16] 陈兰平,樊启毅,焦宝聪. Broyden修正算法[J]. 数学的实践与认识,2005,35(5): 110-114.
- [17] CHEN Lan-ping, FAN Qi-yi, JIAO Bao-cong. Broyden Update Algorithm[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2005,35(5): 110-114.
- [18] 徐政. 交流等值法交直流电力系统潮流计算[J]. 中国电机工程学报,1994,14(3): 1-6.
- [19] XU Zheng. AC Equivalent Approach for AC/DC Power System Load Flow[J]. Proceedings of the CSEE,1994,14(3): 1-6.
- [20] Panosyan A, Oswald B P. Modified Newton-Raphson Load Flow Analysis for Integrated AC/DC Power Systems[A]. In: Universities Power Engineering Conference[C]. 2004.1223-1227.
- [21] 张伯明,陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社,1996.
- [22] 安恒斌,白中治. 关于多元非线性方程的Broyden方法[J]. 计算数学,2004,26(4): 385-400.
- [23] AN Heng-bing, BAI Zhong-zhi. Broyden Method for Nonlinear Equation in Several Variables[J]. Mathematica Munerica Sinica, 2004,26(4): 385-400.

收稿日期: 2007-10-08; 修回日期: 2007-12-04

作者简介:

曾超(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用; E-mail: asa20000@163.com

彭建春(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力市场、电力系统优化运行与控制的研究;

金灵满(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行与控制。