第35卷 第6期
2007年3月16日
继电器
RELAY
Vol.35 No.6
Mar.16, 2007

基于电网分区的并行最优潮流算法实用化研究

朱小军[1]，陈刚[1]，蒋燕[2]

（1. 重庆大学电气工程学院，重庆 400044；2. 重庆电力高等专科学院电力工程系，重庆 400053）

摘要： 在电网分区的基础上，利用"Δ－变量"的特点，研究分析了其与辅助问题原理的结合应用，不仅成功将电网分离为多个计算上完全独立的区域，还通过中间变量解决了由分区计算所引起的多平衡节点问题。电网分区是电力系统的一个重要特征，各个分区进行独立并行优化，充分利用了网络资源，大大缩短了总的运算时间，对电网实时无功优化具有很大的推动作用。同时在分区优化中运用罚函数机制来处理离散变量，避免了简单归整法易出现不可行解的情况，提高了算法的收敛可靠性。文中还通过IEEE118节点算例对研究内容进行了测试，得到了比较满意的效果。

关键词： 最优潮流；电网分区；Δ－变量；辅助问题原理；罚函数

Practical researches of paralleled optimal power flow algorithm based on subarea division of the power system

ZHU Xiao-jun[1], CHEN Gang[1], JIANG Yan[2]

(1. Chongqing University, Chongqing 400044,China; 2. Chongqing Electric Power College, Chongqing 400053,China)

Abstract: This paper analyzes the characteristic of Δ- variables and auxiliary problem principle. The formulas that Δ- variables are used in auxiliary problem principle are discussed in detail. In this way, power system could be divided into several completely independent areas. And multi-balance bus problem which is resulted from subarea division could be solved through Δ- variables. Optimal power flow algorithm based on subarea division makes full use of the network resource, and well promotes real time optimal reactive power. In this paper, penalty function is adopted to deal with discrete control variables in order to avoid appearing infeasible solution. The study of IEEE 118-bus system proves that this method is feasible and practical.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Chongqing(No.2006BB6209).

Key words: optimal power flow; subarea division; Δ- variables; auxiliary problem principle; penalty function

中图分类号： TM74　　文献标识码： A　　文章编号： 1003-4897(2007)06-0025-05

0 引言

最优潮流算法一直是电力系统的重要研究内容之一，随着电网规模的日益增大，传统的最优潮流算法和人工智能算法均存在着计算机内存不足，收敛速度慢等维数灾难问题。而并行算法可以充分发挥机群的优势，以较低的成本和较快的速度完成以往需要大型计算机来完成的工作，尤其是基于电网分区的粗粒度并行计算符合电网实际，并行程度较高。

基于电网分区的分解协调并行优化算法，最早应用于日发电计划优化和分布式最优潮流计算中，文献[1]将其进一步扩展应用于求解大电网最优潮流计算，对整个电网进行分区，将一个整体的最优化问题分解为多个相对独立的子问题，并采用并行迭代求解子问题的方式来完成对整个问题的求解，为电力系统并行优化计算提供了一种新思路。尽管基于电网分区的最优潮流并行计算在运算速度上优势明显，但由于分区所引起的多区域平衡节点问题，以及如何确保各子分区间的独立性，又影响了其实用化效果。

另外，在子分区最优潮流计算中，如何处理变压器变比、并联电容器等离散变量也是个难点问题，直接关系到实用化效果。有文献提出采用正曲

基金项目： 重庆市自然科学基金计划资助项目（CSTC，2006BB6209）

率二次罚函数的线性近似建立离散模型，并与牛顿法最优潮流求解过程结合，引入机制简单有效。但牛顿法对不等式约束条件的处理不够理想，由于原-对偶内点算法的实质是拉格朗日函数、牛顿法和对数壁垒函数三者的结合，可以考虑在原-对偶内点算法中引入二次罚函数，来处理离散变量问题。

为此，本文将在以往研究的基础上，针对上述问题进行深入地分析。

1 基于电网分区的并行优化模型[2]

最优潮流计算是复杂的非线性规划问题，其数学模型一般为：

$$\min f(x) \tag{1}$$
$$\text{s.t.}\quad g(x)=0,\ h(x)\le 0$$

式中：$f(x)$ 为目标函数；$x=\{P,\ Q,\ V,\ \theta\}$，表示发电机有功、无功出力、无功电源出力以及节点电压幅值角度等控制变量或状态变量；$g(x)$、$h(x)$ 分别表示等式约束和不等式约束条件。

最优潮流计算的复杂程度与电网规模密切相关，为降低问题求解的难度，可以考虑根据电网的实际地理分布，在某些联络线处将整个电网分解为多个相对独立的区域，分别进行计算，同时各个区域间通过边界节点产生的约束条件进行协调。下面就将通过节点复制的方法，并以二分区为例介绍大电网的分区及其并行优化模型。

首先将变量 x 分为三部分，x_1、x_2 分别表示两个分区内的变量，y 为两分区间联络线上的节点变量；然后复制节点变量 y，分别表示为 y_1、y_2，并断开联络线，此时电网已被分解为两个独立部分。从整个电网来看，y_1、y_2 两节点应具有相同的电气量，即 $y_1=y_2$。因此原优化模型可表示为：

$$\min f(u_1,u_2)=\min f_1(u_1)+\min f_2(u_2) \tag{2}$$
$$\begin{aligned}\text{s.t.}\quad & g_1(u_1)=0,\ g_2(u_2)=0\\ & h_1(u_1)\le 0,\ h_2(u_2)\le 0\\ & \theta(y)=y_1-y_2=0\end{aligned}$$

其中：$u_1=(x_1,y_1)$，$u_2=(x_2,y_2)$，$\theta(y)$ 为全局约束。暂不考虑分区内约束，由此可得到目标函数的增广拉格朗日函数：

$$L(u,\lambda)=f_1(u_1)+f_2(u_2)+\langle\lambda,\theta(y)\rangle+\frac{c}{2}\langle\theta(y),\theta(y)\rangle \tag{3}$$

其中：c 为常数。

显然，增广二次项虽然增强了收敛性，却破坏了两个子系统间的可分性，同时电网分区计算还出现了多平衡节点问题，如何解决这些问题对分区算法的实用化至关重要。

2 分区后的并行处理

2.1 多平衡节点协调

为提高各分区间计算的独立性，各分区分别定义了各自的平衡节点，从而出现了多个平衡节点，必须进行协调。为此，文献[2]提出了“Δ－变量”的概念，专指在不同的辅助问题中以不同形式出现的变量。优化计算时，电压相角由于多平衡节点的出现而成为“Δ－变量”。“Δ－变量”的特点是可以通过中间变量找到不同表达形式间的关系，下面就将分析如何通过中间变量来协调多平衡节点问题。

取系统中的任意两个相连的节点 h,k，则 h 节点上的约束可写成：

$$P_h-V_h\sum_{k\in h}V_kY_{hk}\cos(\theta_h-\theta_k-\phi_{hk})=0 \tag{4}$$

$$Q_h-V_h\sum_{k\in h}V_kY_{hk}\sin(\theta_h-\theta_k-\phi_{hk})=0 \tag{5}$$

$$I^{\max}-\sqrt{V_h^2+V_k^2-2V_hV_k\cos(\theta_h-\theta_k)}\Big/Z\ge 0\ ^{[3]} \tag{6}$$

式中：V_h、θ_h 为节点 h 相对于全网平衡节点的电压幅值和相角，P_h，Q_h 为节点 h 的注入有功、无功功率，$I^{\max}$ 为 h,k 节点间线路的电流最大值，Y、ϕ、Z 为线路导纳、导纳角及阻抗，其值由电网参数确定。现在以 $\tilde{\theta}_h$、$\tilde{\theta}_k$ 表示节点 h、k 相对于分区子系统平衡节点的电压相角，以中间变量 ϖ_h [4]、ϖ_k 表示分区子系统平衡节点相对于全网平衡节点的电压相角，于是可得：

$$\tilde{\theta}_h=\theta_h-\varpi_h,\ \tilde{\theta}_k=\theta_k-\varpi_k \tag{7}$$

将(7)式代入(4)～(6)式得到：

$$P_h-V_h\sum_{k\in h}V_kY_{hk}\cos((\tilde{\theta}_h+\varpi_h)-(\tilde{\theta}_k+\varpi_k)-\phi_{hk})=0 \tag{8}$$

$$Q_h-V_h\sum_{k\in h}V_kY_{hk}\sin((\tilde{\theta}_h+\varpi_h)-(\tilde{\theta}_k+\varpi_k)-\phi_{hk})=0 \tag{9}$$

$$I^{\max}-\sqrt{V_h^2+V_k^2-2V_hV_k\cos((\tilde{\theta}_h+\varpi_h)-(\tilde{\theta}_k+\varpi_k))}\Big/Z\ge 0 \tag{10}$$

由式(8)～(9)可以看出，若节点 h、k 在同一

分区内，则$\varpi_h=\varpi_k$，其与(4)～(6)式形式一致，仅电压相角变为相对于分区子系统平衡节点的电压相角；反之，hk 线路为两分区间的联络线，则形式会出现变化。显然，变量ϖ只出现在全局约束中，对分区内本地约束和目标函数不产生影响，这就为下面运用辅助问题原理创造了条件。

2.2 辅助问题原理的应用[3,4]

本节将结合多平衡节点协调，运用辅助问题原理进行并行算法分析。考虑到仅电压相角需要进行多平衡节点协调[5]，于是取向量$\omega=(0,\ 0,\ 0,\ \varpi)$作为中间变量，以便于研究分析。分析过程仍以二分区为例，并将分区 2 中的平衡节点取做全局平衡节点，即$\omega_2=(0,\ 0,\ 0,\ 0)$[6]。

根据上节分析可知中间变量ω只出现在全局约束中，故将$\theta(y)$变为$\theta(y,\omega)$，重写增广拉格朗日函数如下：

$$L(u,\omega,\lambda)=f(u)+\langle\lambda,\theta(y,\omega)\rangle+\frac{c}{2}\langle\theta(y,\omega),\theta(y,\omega)\rangle \tag{11}$$

令 $J(y,\omega,\lambda)=\langle\lambda,\theta(y,\omega)\rangle+c/2\langle\theta(y,\omega),\theta(y,\omega)\rangle$，$J_2(u)=f(u)$。辅助问题的原理是，若能构造出一个辅助问题$G(y,\omega,\lambda)+\varepsilon J_2(u)$，且$G'(y,\omega,\lambda)=\varepsilon J'(y,\omega,\lambda)$则原问题可转化为求解一系列迭代形式的辅助鞍点问题，其中每一次迭代的辅助问题均为可分解问题，现构造辅助问题如下：

$$G(y,\omega,\lambda)=K(y,\omega,\lambda)+\langle\varepsilon J'(y,\omega,\lambda)-K'(y,\omega,\lambda),(y,\omega,\lambda)\rangle \tag{12}$$

式中：$\varepsilon>0$，$K(y,\omega,\lambda)$为核函数，可构造为：

$$K(y,\omega,\lambda)=\tfrac{\beta}{2}\|y\|^2+\tfrac{\gamma}{2}\|\omega\|^2+\tfrac{1}{2}\|\lambda\|^2=K(y,\omega)+\tfrac{1}{2}\|\lambda\|^2 \tag{13}$$

根据辅助问题原理的两层算法模型，求解(2)式得：

$$(u^{k+1},\omega^{k+1})=\arg\min\{\varepsilon f(u)+K(y,\omega)+\langle\varepsilon J'(y^k,\omega^k,\lambda^k)-K'(y^k,\omega^k),(y,\omega)\rangle\} \tag{14}$$

$$\lambda^{k+1}=\lambda^k+\alpha\theta(y^{k+1},\omega^{k+1}) \tag{15}$$

将$K(y,w)$代入式(14)得：

$$(u^{k+1},\omega^{k+1})=\arg\min\{\tfrac{\beta}{2}\|y\|^2+\tfrac{\gamma}{2}\|\omega\|^2-(\beta y^{k^T}y+\gamma\omega^{k^T}\omega)+\varepsilon\langle\lambda^k+c\theta(y^k,\omega^k),\theta(y,\omega)\rangle+\varepsilon f(u)\} \tag{16}$$

由于分区 2 的平衡节点已被取为全局平衡节点，故全局约束条件为$\theta(y,\omega)=y_1+\omega_1-y_2$，将其代入式(16)，并展开为两个分区得到：

$$(u_1^{k+1},\omega_1^{k+1},u_2^{k+1})=\arg\min\{\varepsilon f_1(u_1)+\varepsilon f_2(u_2)+\tfrac{\beta}{2}\|y_1\|^2+\tfrac{\gamma}{2}\|\omega_1\|^2+\tfrac{\beta}{2}\|y_2\|^2-(\beta y_1^{k^T}y_1+\gamma\omega_1^{k^T}\omega_1)-\beta y_2^{k^T}y_2+\varepsilon[\lambda^k+c(y_1^k+\omega_1^k)-cy_2^k](y_1+\omega_1-y_2)\}^{[7]} \tag{17}$$

由上式可以看出，经过辅助问题原理的运用，整个电网的求解显然可以分为两个子系统并行求解，其中分区 1 的求解式如下：

$$(u_1^{k+1},\omega_1^{k+1})=\arg\min\{\varepsilon f_1(u_1)+\tfrac{\beta}{2}\|y_1\|^2+\tfrac{\gamma}{2}\|\omega_1\|^2-(\beta y_1^{k^T}y_1+\gamma\omega_1^{k^T}\omega_1)+\varepsilon[\lambda^k+c(y_1^k+\omega_1^k)-cy_2^k](y_1+\omega_1)\}^{[8]} \tag{18}$$

而式(18)里的中间变量ω又可与变量u分开求解，从而得到子分区 1 的迭代优化公式如下：

$$u_1^{k+1}=\arg\min\{\varepsilon f_1(u_1)+\tfrac{\beta}{2}\|y_1\|^2-\beta y_1^{k^T}y_1+\varepsilon[\lambda^k+c(y_1^k+\omega_1^k)-cy_2^k]y_1\} \tag{19}$$

$$\omega_1^{k+1}=\arg\min\{\tfrac{\gamma}{2}\|\omega_1\|^2-\gamma\omega_1^{k^T}\omega_1+\varepsilon[\lambda^k+c(y_1^k+\omega_1^k)-cy_2^k]\omega_1\} \tag{20}$$

$$\lambda_1^{k+1}=\lambda_1^k+\alpha(y_1^{k+1}+\omega_1^{k+1}-y_2^{k+1}) \tag{21}$$

为满足迭代收敛，式中$0<\alpha<2c$。从式(19)可知，只需知道某个子分区的内部变量以及相邻子分区边界变量前一次的优化值，即可完成独立计算。优化过程中，相邻子分区间需交换边界点变量值，以更新λ，进行下一次迭代，当$\theta(y,\omega)$趋近于零时迭代结束。

由于迭代优化公式考虑了中间变量ω，故式(19)～(21)中的变量u,y均相对于本地平衡节点而言。至于子分区 2，其平衡节点即为全局平衡节点，故迭代公式中不再涉及对中间变量ω_2的求取。

中间变量ω只出现在全局约束的特点，为我们先直接采用本地变量进行优化，再更新本地平衡节点创造了条件。另外，由式(19)、(20)可知，本地平衡节点在全网中的相角和本地变量是分开求解的，对子分区内的优化不产生影响。

3　子分区优化中的离散变量处理[5,6]

文献[5]在牛顿法中引入正曲率二次罚函数以建立离散模型，引入机制简单有效。但牛顿法在处理不等式约束时不够理想，于是本文考虑在原-对偶内点算法中引入二次罚函数，以处理离散变量问题。

原-对偶内点算法的实质是拉格朗日函数、牛顿法和对数壁垒函数三者的结合，其内嵌二次罚函数的机理与牛顿法类似。通过罚函数来模拟离散控制的虚拟值，这一附加于优化值上的虚拟值将迫使离散控制变量靠在某一个分级上。该方法与传统的优化后简单取整截然不同，因为这些离散变量还将

受到全局优化带来的优化值降低的作用。

二次罚函数的引入必须有利于计算的快速准确收敛，故引入的时机十分关键。研究表明，在前几次迭代中引入罚函数将会干扰目标函数的下降，而引入的过晚又将延缓计算的收敛。因此，惩罚项引入的时机应当满足两个条件：一是最优解处的不等式约束集被基本锁定；二是离散控制变量的修正量小于某一阈值。文献[7]指出，在非线性原-对偶内点算法中，不等式约束的满足情况可从迭代过程中的补偿间隙 K_{gap} 直观反映出来，随着起作用的不等式约束基本确定，补偿间隙会迅速减小。本文把 $K_{gap}<10^{-2}$ [9]，且相邻两次迭代离散变量的变化 K_c 小于其分级步长 S 的 $\frac{1}{8}$ 作为引入二次罚函数的条件[7,8]。

4 分区并行算法求解过程

本文通过运用辅助问题原理实现大电网的分区，在子分区优化中，采用内嵌二次罚函数的非线性原-对偶内点法进行离散变量和不等式约束处理，整个算法的求解过程如下：

(1) 采用式(19)～(21)构成的分解协调模型将电网分解为数个分区。

(2) 系统参数以及收敛条件等数据初始化，令迭代次数 $K=0$。

(3) 各子分区内，运用内嵌二次罚函数的非线性原-对偶内点法独立完成优化计算。

(4) 所有分区运算完成，相邻分区间交换边界数据，并按式(20)、(21)更新 $\boldsymbol{\lambda}$、$\boldsymbol{\omega}$。

(5) 当所有分区的边界数据差值小于某一阀值时，停止迭代，否则令 $K=K+1$，转步骤(3)。

5 算例分析

本文以 IEEE118 节点测试系统为例，采用两台处理器为 P4 1.6G 的计算机对文中讨论的计算方法进行验证和分析。测试系统的基本数据信息如表 1 所示。

其中二分区系统中，以节点 23，68，69 作为分界点，分区一以节点 70 作为平衡节点（同时作为全网平衡节点），分区二以节点 34 为平衡节点。为验证本文方法的实用效果，故采用以下三种方式对测试系统进行最优潮流计算。

表 1 IEEE118 节点测试系统基本数据

Tab.1 Basic data of IEEE 118-bus test system

	基本系统	二分区系统
节点数	118	46/69
支路数	179	72/107
补偿电容器	15	7/8
可调变压器	9	2/7
中间变量 ω	0	1
边界节点数	0	3
全局约束	0	12

(1) 电网未分区，采用非线性原－对偶内点法计算。

(2) 电网二分区，采用非线性原－对偶内点法计算。

(3) 电网二分区，采用内嵌二次罚函数的非线性原－对偶内点法计算。

在方法二、三中，选取 $c=1.0$，$\alpha=0.18$，$\beta=1.0$，$\gamma=8.3$，$\varepsilon=0.83$，以 $\theta(y)<0.02$ 作为收敛判据。方法三中，将补偿间隙 $K_{gap}<10^{-2}$ 且相邻两次迭代离散变量的变化 $K_c<\frac{1}{8}s$ 作为引入罚函数的条件；同时给定子分区优化的收敛精度 $\varepsilon_1=10^{-6}$ 和 $\varepsilon_2=0.5\times10^{-3}$，并将 $K_{gap}<\varepsilon_1$ 且最大潮流偏差 $<\varepsilon_2$ 作为子分区优化的收敛判据[10]。三种方法分别进行运算，主要计算结果列于表 2 中。

表 2 三种方法优化结果对比

Tab.2 Comparison of optimum results by three methods

	方法一	方法二	方法三
网损/MW	118.83	119.27	104.17
迭代次数	8	12	13
计算时间/s	12.21	8.87	9.33
中间变量 ω_0 值	\	-4.9632	-4.9614
V_{33}/θ_{33}	1.0117/-5.2291	1.0135/-5.2321	1.0139/-5.2298
V_{34}/θ_{34}	1.0201/-4.9608	1.0241/-4.9632	1.0240/-4.9614
V_{35}/θ_{35}	1.0197/-5.2873	1.0210/-5.2904	1.0199/-5.2863
V_{83}/θ_{83}	1.0093/5.8950	1.0058/5.8775	1.0116/5.8742
V_{84}/θ_{84}	1.0113/9.5601	1.0098/9.5499	1.0128/9.5504
V_{85}/θ_{85}	1.0220/10.9453	1.0204/10.9424	1.0243/10.9411

（注：表中节点为任意选取，方法二、三中迭代次数指分区并行算法主迭代次数）

由表 2 可以看出，在计算时间上，采用了分区算法后有明显下降。方法三中二次罚函数的引入影响了子分区内点法的收敛迭代次数，故计算时间较方法二有所增加。方法一电网未分区时，尽管迭代 8 次就达到收敛，但每次迭代耗时过多，故总时间仍远高于分区算法。若系统节点更多，分区数适当的话，本文的方法在计算时间上更具优势。另外，

由于本文的辅助问题原理中结合了“Δ－变量”来处理多平衡节点问题，所得节点电压相角与方法一的未分区算法相比，精度上基本在误差范围之内。

方法三中，不仅采用分区算法节省了总的计算时间，而且由于二次罚函数的引入，优化后的网损也有所下降，而总迭代次数却无显著变化，同时避免了离散变量简单归整法易出现不可行解的情况。

6 结论

本文提出了一种基于电网分区的并行最优潮流算法，各子分区单独优化，大大降低了求解问题的复杂度。“Δ－变量”的运用，改进了以往的辅助问题原理模型，在解决分区问题的同时，也解决了分区引起的多平衡节点协调问题。由于中间变量与子分区变量在全网的相角是分别迭代的，故未增加子分区优化的求解复杂度。另外，在子分区优化中采用二次罚函数机制处理离散变量，避免了出现不可行解，提高了算法的收敛可靠性。

通过 IEEE 118 节点算例进行对比测试，本文的方法在求解精度、优化结果以及计算时间上均令人满意，非常适合求解大规模电力系统的无功优化问题，具有较强的实用价值。

参考文献

[1] 程新功，厉吉文，曹立霞. 电力系统最优潮流的分布式并行算法[J]. 电力系统自动化，2003，27(24):23-27.
CHENG Xin-gong, LI Ji-wen, CAO Li-xia. Distribute and Parallel Optimal Power Flow Solution of Electronic Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2003, 27(24): 23-27.

[2] Losi A, Russo M. On the Application of Auxiliary Problem Principle[J]. Journal of Optimization Theory and Application, 2003,117(2):377-396.

[3] Cohen G. Auxiliary Problem Principle and Decomposition of Optimization Problems[J].Journal of Optimization Theory and Application, 1980, 32(3):277-305.

[4] 程新功，厉吉文，曹立霞. 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.
CHENG Xin-gong, LI Ji-wen, CAO Li-xia. Multi-objective Distributed Parallel Power Optimization Based on Subarea Division of the Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23 (10): 109-113.

[5] 赵晋泉，侯志俭，吴际舜. 牛顿最优潮流算法中离散控制量的新处理方法[J]. 电力系统自动化，1999, 23(23):37-40.
ZHAO Jin-quan, HOU Zhi-jian, WU Ji-shun. A Novel Quadratic Penalty Function Based Discretization Algorithm for Newton Optimal Power Flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (23) : 37-40.

[6] Santos J R, Lora A T, Exposito A G. Finding Improved Local Minima of Power System Optimization Problems by Interior-point Methods [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (1) : 238-244.

[7] Crisan O, Mohtadi M A. Efficient Identification of Binding Inequality Constraints for the Optimal Power Flow Newton Approach[J]. IEE Proceedings-C 1992, 139(5) : 365-370.

[8] 程莹，刘明波. 含离散控制变量的大规模电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报，2002, 22(5):54-60.
CHENG Ying, LIU Ming-bo. Reactive Power Optimization of Large-scale Power Systems with Discrete Control Variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 54-60.

收稿日期：2006-10-21；　修回日期：2006-11-26

作者简介：

朱小军（1981- ），男，硕士研究生，主要研究方向为电力系统无功优化计算及电力市场；E-mail:zhuxj811005@sina.com

陈　刚（1964- ），男，重庆大学副研究员，博士，主要研究方向为电力系统运行与控制、微机在电力系统中的应用以及电力市场。

（上接第 20 页　continued from page 20）

收稿日期：2006-09-30；　修回日期：2006-11-30

作者简介：

陈　洁（1971－），女，工程师，长期从事继电保护运行管理工作；

何志勤（1982-），男，硕士研究生，从事牵引供电系统微机继电保护研究；E－mail: hzq@ecjtu.jx.cn

叶　青（1976－），男，工程师，长期从事继电保护运行管理及整定计算工作。