

# 一种配电网合环实用潮流算法

王秀云, 杨劲松, 熊谦敏, 张迎新

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 针对配电网合环潮流计算难度大, 前推回代法只适用于辐射型配电网, 提出了一种计算配电网合环潮流的两阶段法。第一阶段中, 运用叠加原理, 将合环后环状配电网转化为纯辐射状配电网。用前推回代法对纯辐射状配电网潮流计算, 从而得到合环开关两侧电压差。在第二阶段, 不断修正合环开关两侧负荷功率, 以支路功率为变量, 重新运用前推回代法求解纯辐射状网络潮流, 直至达到整体收敛。针对配电网调度室无法获取上级电网的实时信息, 利用迭代法求取上级电网等值阻抗。通过对实际算例仿真, 结果表明该方法具有良好的收敛性和准确性。

**关键词:** 两阶段法; 叠加原理; 前推回代法; 合环潮流

## A practical algorithm of load flow calculation for loop distribution networks

WANG Xiu-yun, YANG Jin-song, XIONG Qian-min, ZHANG Ying-xin

(School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** The paper presents a two-stage loop power flow calculating method in distribution networks with the variables of branch power according to the problems that the loop power flow calculation in distribution networks is difficult and the forward/backward sweep method is suitable for radial distribution networks. In the first stage, the meshed network is converted to a pure radial network by applying the superposition principle. Then the forward/backward sweep method is employed to attain the voltage differences across the sectionalizer of the radial distribution networks. In the second stage, continuously modifying the load power across the sectionalizers, the forward/backward sweep method is employed to attain the power flow of the radial distribution networks once again and finally tended to the global convergence. In view of the problems that the control center of distribution networks can not obtain the high-voltage power grid real-time information, iteration method is used to attain equivalent impedance of the high-voltage power grid. Actual examples and simulation results verify the astringency and accuracy of the proposed method.

**Key words:** two-stage method; superposition principle; forward/backward sweep method; loop closing power flow

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)06-0023-04

## 0 引言

国内 10 kV 配电网一般采用闭环设计、开环运行的供电方式<sup>[1]</sup>。在倒负荷和检修时, 通过合、解环操作可以减少停电时间, 提高供电可靠性, 但由此引起的合环电流可能使馈线开关保护误动, 造成用户停电。因此, 提高合环潮流计算的准确性尤为重要, 它能为实际系统的合环操作提供决策支持, 达到提高供电可靠性和配网安全运行的目的。

由于配电网R/X比值较高, 传统的配电网潮流算法主要为: 回路阻抗法<sup>[2]</sup>、前推回代法<sup>[3]</sup>和改进牛顿法<sup>[4]</sup>。目前, 对于配电网环网的潮流计算, 文献[5]提出分布系数法的潮流计算方法, 该方法需要手工计算, 只适合简单网络的合环潮流; 文献[6]

运用叠加原理将网络分解为两个网络: 不含环状结构的纯辐射状网络和不含辐射状结构的纯环状网络。然后对两个网络分别求解三相潮流; 文献[7]提出了计算环状配电网的三相潮流“两阶段”法。该方法以支路电流为变量, 计算存在一定的误差。本文提出了以支路功率为变量的基于叠加原理和前推回代法两阶段算法, 用于计算配电网合环潮流。通过断开合环开关解环, 形成两个网络: 开环运行的网络即纯辐射状网络和仅保留环状支路和合环点处电压源的纯环状网络。通过两阶段迭代来求解潮流问题: 第一阶段迭代计算开环运行的网络潮流, 得出合环开关两端电压差, 而第二阶段迭代不断修正合环开关两侧负荷功率达到整体收敛, 从而得出配电网合环潮流。

### 1 基于支路功率为变量的前推回代法

文献[8]对前推回代法的收敛机理进行了详细论证。对于如图1所示的辐射状配电系统，配电潮流前推回代算法的第 $m$ 步迭代过程如下：

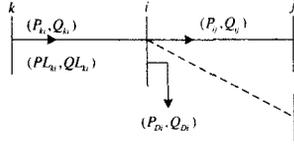


图1 辐射状配电系统

Fig. 1 A radial distribution system

节点 $i$ 的前推计算公式为：

$$P_{ki}^{(m+1)} = P_{Di}^{(m)} + \sum_{j \in C_i} P_{ij}^{(m+1)} + (PL_{ki}^{(m+1)})' \quad (1)$$

$$Q_{ki}^{(m+1)} = Q_{Di}^{(m)} + \sum_{j \in C_i} Q_{ij}^{(m+1)} + (QL_{ki}^{(m+1)})' \quad (2)$$

式中：

$$(PL_{ki}^{(m+1)})' = r_{ki} \cdot \frac{(\sum_{j \in C_i} P_{ij}^{(m+1)} + P_{Di}^{(m)})^2 + (\sum_{j \in C_i} Q_{ij}^{(m+1)} + Q_{Di}^{(m)})^2}{(V_i^{(m)})^2} \quad (3)$$

$$(QL_{ki}^{(m+1)})' = x_{ki} \cdot \frac{(\sum_{j \in C_i} P_{ij}^{(m+1)} + P_{Di}^{(m)})^2 + (\sum_{j \in C_i} Q_{ij}^{(m+1)} + Q_{Di}^{(m)})^2}{(V_i^{(m)})^2} \quad (4)$$

式中： $(r_{ki}, x_{ki})$ 为支路 $ki$ 的阻抗；下标 $Di$ 表示节点 $i$ 的负荷功率； $C_i$ 表示与节点 $i$ 相连的子节点集合； $[(PL_{ki}^{(m+1)})', (QL_{ki}^{(m+1)})']$ 为馈线支路 $ki$ 上的功率损耗。

回代节点 $i$ 的电压时，节点 $k$ 作为节点 $i$ 的父节点，其电压已经在本次迭代中算出，节点 $i$ 的回代公式为：

$$\dot{V}_i^{(m+1)} = \dot{V}_k^{(m+1)} - \dot{I}_{ki}^{(m+1)} \cdot (r_{ki} + jx_{ki}) \quad (5)$$

$$\dot{I}_{ki}^{(m+1)} = \frac{P_{ki}^{(m+1)} - jQ_{ki}^{(m+1)}}{\hat{V}_k^{(m+1)}} \quad (6)$$

式中： $\hat{V}_k$ 为节点 $k$ 复电压的共轭。 $V$ 加下标 $k$ 。

迭代终止判据为：判断相邻两次迭代电压差的模分量的最大值  $\max_i |\Delta \dot{V}_i|$  是否小于给定的收敛指标  $\varepsilon$ ，即  $\max_i |\Delta \dot{V}_i| \leq \varepsilon$ 。 (7)

### 2 配电网合环潮流计算

#### 2.1 利用叠加原理分解合环配电网

前推回代法只能用于辐射型网络，对于合环后的环网，本文利用叠加原理对前推回代法进行改进，在合环点处将环网打开，对合环开关两侧负荷功率进行修正，如图2所示。

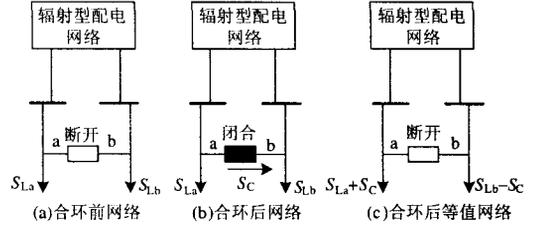


图2 配电网合环模型

Fig. 2 Closed loop model of distribution network

图2(a)中 $a$ 、 $b$ 为待闭合合环开关的两侧节点，合环前所带负荷分别为 $S_{La}$ 、 $S_{Lb}$ ；图2(b)为合环后示意图，合环开关闭合后由 $a$ 、 $b$ 两侧节点电压差所产生的环网功率 $S_C$ ，相应的电流为 $I_C$ 。若合环前 $U_a > U_b$ ，为模拟合环时的状态在节点 $a$ 添加一个电流源，方向为流出，在节点 $b$ 添加一电流源，方向为流入，大小均为 $I_C$ 。图2(c)为合环后等效网络示意图，将环网功率 $S_C$ 分别转移到负荷点 $a$ 、 $b$ 上，即 $a$ 节点负荷为 $S_{La} + S_C$ ， $b$ 节点负荷为 $S_{Lb} - S_C$ 。若合环前 $U_a < U_b$ ，则电流源的符号相反。

用戴维南定理对 $S_C$ 进行求解。图2(b)中原辐射型网络可等效为一个理想电压源 $\dot{U}_{OC}$ 和一个串联内阻 $Z_{ab}$ ，如图3所示。

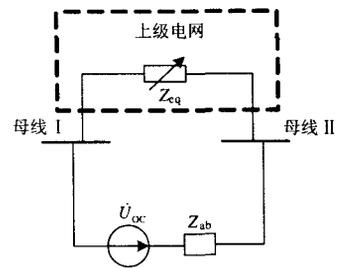


图3 合环稳态环流计算等效电路图

Fig. 3 Equivalent diagram of steady current calculation

图3中电压源 $\dot{U}_{OC}$ 的值为合环前 $a$ 和 $b$ 节点的电压差 $\dot{U}_a - \dot{U}_b$ 。 $\dot{U}_a$ 、 $\dot{U}_b$ 可在合环前通过前推回代法进行潮流计算得到。 $Z_{ab}$ 为戴维南等效阻抗。当

网络中所有电源电势都为零时, 所加的单位电流只流经环路上支路。所以  $Z_{ab}$  即为从母线 I 到母线 II 合环线路中所有支路阻抗和。

合环后稳态环流:

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_{oc}}{Z_{ab} + Z_{eq}} \quad (8)$$

因为配电网合环涉及到了上级电网。所以需要上级电网进行等值。  $Z_{eq}$  为上级电网等值阻抗。这样可以求得环网功率  $S_c$ 。难点是  $Z_{eq}$  的求取。

## 2.2 迭代法求上级电网等值阻抗

针对从不同变电所引出两条出线的环网, 配电网合环网络与上级电网之间存在边界节点的特点, 本文利用迭代法来求取上级电网等值阻抗  $Z_{eq}$ 。

根据母线 I、II 参数, 选取电压值高的一侧为始端, 如母线 I 电压值高, 由始端电压  $U_1$ , 可计算出母线 II 处的电压幅值为:

$$U_2' = \left[ \left( U_1 - \frac{P_1 r l + Q_1 x l}{U_1} \right)^2 + \left( \frac{P_1 x l - Q_1 r l}{U_1} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

式中:  $P_1$  为流过母线 I 的有功功率, 单位 kW;  $Q_1$  为无功功率, 单位 kvar。  $z = r + jx$  为根据实际上级电网的特点, 设定的虚拟线路单位长度的阻抗, 单位  $\Omega/\text{km}$ ;  $l$  为虚拟线路长度, 单位 km。

设误差函数  $U_{er}$  为:

$$U_{er} = U_2 - U_2' \quad (10)$$

当  $U_{er}$  的绝对值小于指定误差极限时, 则认为迭代已经收敛; 当  $U_{er}$  大于零时, 则在下一次迭代对  $l$  增加步长  $\Delta l$ ; 当  $U_{er}$  小于零时, 则在下一次迭代时对  $l$  减小步长  $\Delta l$ 。当迭代过程中,  $U_{er}$  的值来回震荡时, 可以根据变步长系数  $p_r$  将步长  $\Delta l$  缩小, 即  $\Delta l = \Delta l p_r$ , 继续进行迭代, 便可求出  $l$  的值。这样可以求出  $Z_{eq}$ 。

## 2.3 配电网合环潮流计算步骤

配电网合环潮流计算分两阶段迭代, 第一阶段迭代按式(1)~(7)计算纯辐射型网络潮流和  $\dot{U}_a$ 、 $\dot{U}_b$  值, 第二阶段迭代以环路功率为变量叠加修正, 按式(11)~(14)修正合环开关两侧节点负荷功率, 第  $m+1$  次迭代过程如下:

$$\dot{U}_{oc}^{(m)} = \dot{U}_a^{(m)} - \dot{U}_b^{(m)} \quad (11)$$

$$\dot{I}_c^{(m)} = \dot{U}_{oc}^{(m)} / (Z_{ab} + Z_{eq}) \quad (12)$$

$$S_{La}^{(m+1)} = S_{La}^{(m+1)} + \dot{U}_a^{(m)} \cdot \hat{I}_c^{(m)} \quad (13)$$

$$S_{Lb}^{(m+1)} = S_{Lb}^{(m+1)} - \dot{U}_b^{(m)} \cdot \hat{I}_c^{(m)} \quad (14)$$

$$\max_i |U_{oc}^{(m+1)}| \leq \varepsilon' \quad (15)$$

初始化  $S_{La}^{(0)}$ 、 $S_{Lb}^{(0)}$  分别为合环开关两侧节点负荷,  $\hat{I}_c^{(m)}$  为合环稳态电流的共扼值, 式(15)为迭代终止判据, 即在  $m+1$  次迭代时, 合环开关两侧节点的电压差小于给定的收敛指标  $\varepsilon'$ 。

计算配电网合环潮流的步骤如下:

阶段一:

- 1) 读入网络参数, 建立节点链接表。
- 2) 按式(9)、(10)通过迭代法求得上级电网的等值阻抗  $Z_{eq}$ 。通过拓扑分析从合环点向上搜索, 将合环支路的阻抗与上级电网的等值阻抗  $Z_{eq}$  相加而得合环环路的总阻抗。

3) 按式(1)~(7)通过前推回代计算纯辐射网络潮流。按式(11)计算断开合环点处开口电压。

4) 按式(12)求得合环稳态环流。

阶段二:

- 1) 按式(13)~(14)修正合环开关两侧节点负荷功率。
- 2) 检查迭代终止判据式(15), 若不满足则转到阶段一中 3)~4)。

## 3 算例分析

本文选取吉林市 10 kV 配网系统的三个典型的馈线联络开关合环算例进行了计算。在 PC 机上用 VB6.0 进行了该算法的程序编制。算例中两阶段的收敛判据  $\varepsilon$ 、 $\varepsilon'$  都为  $10^{-5}$ 。算例结果(见表 1)表明, 准确率较高, 满足工程要求。

从表 1 可以看出本文算法计算出的合环馈线电流值与测量值比较接近, 与文献[9]算例的结果比较, 误差较小, 但也存在一定的误差, 主要有以下几个方面:

1) 由于无法获取上级电网模型, 因此也就无法准确地获得上级电网的阻抗, 本文采用迭代法虽简化了上级电网, 但求得的等值阻抗对合环潮流计算存在着一定的误差。

2) SCADA 系统遥测量、遥信量的准确程度影响计算的精度。

3) 功率因数无法获得。由于在实际运行时, 配网测得的有一些是电流值, 不是  $P$ 、 $Q$  值, 这

样就需要用电流值和功率因数推导出  $P$ 、 $Q$  的大小，而功率因数也非实测值，所以功率因数的准

确与否对合环计算的误差有一定影响。本方法取用功率因数为 0.9。

表 1 计算结果  
Tab.1 Calculation results

算例	母线	10 kV 母线电压/kV	合环前馈线电流 /A	合环潮流/kVA 计算值	合环后馈线电流/A		误差/(%)
					计算值	测量值	
1	I	10.2	135	759+j180.1	78.3	83	5.66
	II	10.1	0	586+j168.3	60.8	58	4.83
2	I	10.3	0	683+j127.5	72.6	75	3.2
	II	10.1	251	2 532+j963.4	275.4	269	2.38
3	I	10.0	169	1 547+j436.9	176.8	181	2.32
	II	10.3	73	893+j167.3	92.5	95	2.63

表 2 迭代过程中的功率修正量

Tab.2 Correction terms of power during iterative process

算例	迭代次数	a 端功率修正量/kW	b 端功率修正量/kW
1	1	216.34+j135.6	-234.8-j170.1
	2	-46.381-j17.34	65.432+j16.72
	3	-0.347 3-j0.513 2	0.543 7+j0.481 2
	4	-0.002 8+j0.001 3	0.032 6-j0.002 7
	5	2.68e-006+j1.32e-007	-4.32e-007-j1.96e-006
2	1	-1 080.3-j690.35	1 270+j730.96
	2	42.826+j13.64	-49.381-j18.48
	3	0.524 1-j0.528 7	-0.632 1+j0.357 2
	4	0.004 3-j0.002 7	-0.002 9+j0.003 6
	5	-2.57e-006-j1.59e-005	3.96e-006+j1.17e-005
3	1	-302.08-j803.26	207.17+j603.65
	2	56.436+j11.991	-59.735-j14.568
	3	-0.998-j0.392	0.751+j0.531
	4	0.007 39+j0.005 28	-0.008 24+j0.007 46
	5	-2.64e-006+3.25e-005	-3.29e-006+5.38e-006

从表 2 中可以看出功率修正量在迭代过程中的变化关系，随着迭代次数的增加，合环开关两侧功率修正量的值是逐渐减小。一般第二阶段迭代到 5 次左右功率修正量的值几乎接近于零。通过算例可以看出，本文提出的算法有很好的收敛性。从而提高了计算速度。

### 4 结论

1) 本文利用叠加原理分解合环配电网，转化为纯辐射状的潮流计算，通过两阶段迭代，结果表明该方法运行速度快、精度高，是一种很有价值的算法。

2) 应用迭代法求取上级电网的阻抗。目前还没有比较有效的方法来等值。该方法具有计算简单、实用、精度高的特点。

本文提出的算法较好地解决了配电网合环潮流计算难度大、误差大的难题，在实际合环操作中，对调度员能否合环操作起到了指导作用，提高了合环操作的可靠性、安全性，具有一定的理论和工程实用价值。

### 参考文献

- [1] 孙寄生. 10kV 环网供电技术研究及应用[J]. 中国电力, 1999, 32(2).  
SUN Ji-sheng. Study on and Application of Power Supply Techniques for 10kV Loop Networks [J]. China Power, 1999, 32(2).
- [2] Goswami S K, Basu S K. Direct Solution of Radial Distribution Networks[J]. Proceedings of IEE, Part C, 1991, 138(1): 78-88.
- [3] Shirmonhammad D, Hong H W, Semlyen A, et al. A Compensation-based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1988, 3 (2): 753-762.
- [4] Zhang F, Cheng C. A Modified Newton Method for Radial Distribution System Power Flow Analysis [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 389-397.
- [5] 强兴华. 地区电网合环操作的潮流近似计算[J]. 江苏电机工程, 2002, 21(5).  
QIANG Xing-hua. Approximate How Calculation During Closed Loop Operation in Local Electric Network[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2002, 21(5).
- [6] 车仁飞, 李仁俊. 一种少环配电网三相潮流计算新方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (1): 74-79.  
CHE Ren-fei, LI Ren-jun. A New Three-phase Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (1): 74-79.

(下转第 31 页 continued on page 31)

- Network Algorithm of Power Loss Reduction[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [4] 毕鹏翔, 刘健, 张文元. 配电网网络重构的研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 54-60.  
BI Peng-xiang, LIU Jian, ZHANG Wen-yuan. A Study of Algorithms of Reconfiguration of Distribution Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(14): 54-60.
- [5] 梁勇, 张焰, 侯志俭. 遗传算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10(4): 29-34.  
LIANG Yong, ZHANG Yan, HOU Zhi-jian. Application of Genetic Algorithm in Power Distribution System Reconfiguration[J]. Proceedings of the EPSA, 1998, 10(4): 29-34.
- [6] 汪定伟. 智能优化方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.  
WANG Ding-wei. Intelligent Optimization Methods[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [7] 孙艳丰. 基于遗传算法和禁忌搜索算法的混合策略及其应用[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(3): 258-262.  
SUN Yan-feng. A Hybrid Strategy Based on Genetic Algorithm and Tabu Search[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(3): 258-262.
- [8] 刘莉, 陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网网络重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 66-69.  
LIU Li, CHEN Xue-yun. Reconfiguration of Distribution Networks Based on Fuzzy Genetic Algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 20(2): 66-69.
- [9] 毕鹏翔, 刘健, 张春新. 配电网网络重构的改进遗传算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 57-61.  
BI Peng-xiang, LIU Jian, ZHANG Chun-xin. A Refined Genetic Algorithm for Power Distribution Network Reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 57-61.
- [10] 何宏杰. 基于二进制粒子群算法的配电网重构研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2006.  
HE Hong-jie. A Study of Distribution Network Reconfiguration based on Improved Binary Particle Swarm Optimization Algorithm[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2006.
- [11] 贺一, 刘光远, 邱玉辉. Tabu Search 中集中性和多样性的自适应搜索策略[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(1): 162-166.  
HE Yi, LIU Guang-yuan, QIU Yu-hui. A Novel Adaptive Search Strategy of Intensification and Diversification in Tabu Search[J]. Journal of Computer Research and Development, 2004, 41(1): 162-166.
- [12] 葛少云, 刘自发, 余贻鑫. 基于改进禁忌搜索的配电网重构[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 22-26.  
GE Shao-yun, LIU Zi-fa, YU Yi-xin. An Improved Tabu Search for Reconfiguration of Distribution Systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 23-27.
- [13] 王毅. 基于改进自适应遗传算法的配电网重构[J]. 电力系统自动化设备, 2005, 25(12): 45-48.  
WANG Yi. Refined Adaptive Genetic Algorithm for Distributing Network Reconfiguration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(12): 45-48.

收稿日期: 2008-05-05; 修回日期: 2008-07-14

作者简介:

王林川 (1955-), 男, 教授, 现从事配电网方面的研究; E-mail: wanglinc@mail.nedu.cn

梁栋 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网优化运行;

于冬皓 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网优化运行。

(上接第 26 页 continued from page 26)

- [7] 陈根军, 王磊, 唐国庆. 一种求解环状配电网潮流的有效算法—两阶段法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(5): 5-9.  
CHEN Gen-jun, WANG Lei, TANG Guo-qing. An Efficient Two-state Load Flow Method for Meshed Distribution Network[J]. Proceedings of the EPSA, 2001, 13(5): 5-9.
- [8] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 配电网潮流前推回推法的收敛性研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 26-29.  
SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, XIANG Nian-de. Study on Convergence of Back/forward Sweep Distribution Power Flow[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 26-29.
- [9] 叶清华, 唐国庆, 王磊, 等. 配电网合环操作环流分析系统的开发和应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 26(22): 66-69.  
YE Qing-hua, TANG Guo-qing, WANG Lei, et al. Development and Application of the Analysis System for Closed Loop Operation of Distribution Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 66-69.

收稿日期: 2008-05-11; 修回日期: 2008-06-13

作者简介:

王秀云 (1977-), 女, 讲师, 研究方向为电力系统自动化;

杨劲松 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: jin121@163.com

熊谦敏 (1981-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化。