

基于 MST 和 IGA 的全局多目标电网优化

吕后勇¹, 周步祥²

(1. 湖南常德电业局, 湖南 常德 415000; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:在多电压等级电网优化规划中竭力寻求电网中某一负荷点或大用户预得到的最优供电方案,同时电网的安全性、经济性和可靠性基本要求均得到满足。这种电网优化思想不仅让用户得到优质服务,同时也从技术层面上解决了现代电力市场输配电的技术方案难题。基于三大基本要求,分别建立了电网投资及线损最少模型、电网节点短路电流平均最小模型、电网安全供电准则 N-1 模型。利用最小生成树思想构造电力网的最小生成树(MST),利用 IGA(改进遗传算法)在全局目标函数中选取优化方案,最后得到了很好的实际应用效果。

关键词:最小生成树;电网优化;改进遗传算法

Abstract: Optimization in multi-voltage power grid planning efforts to seek a load points or large users to obtain the optimal power supply programs at the same time, the basic requirements of the network security, economy and reliability are met. This idea not only allows the users to get the availability of quality services, but also from a technical level meets the solution problems of power market transmission and distribution. Based on the three basic requirements, the least models of network investment and line loss, the average short-circuit current node and network security standards N-1 are established. The idea of minimum spanning tree is used to construct the minimum spanning tree (MST) of power grid, the improved genetic algorithm (IGA) is used to select the optimal programs in the objective function, and finally it has obtained the good effect in practical application.

Key words: minimum spanning trees; power grid optimization; improved genetic algorithm

中图分类号: TM714 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2010)05-0079-06

0 引 言

目前关于大型电网优化规划的研究中,要么只单研究高压电网中的某一电压等级优化问题,比如站址选择优化或电网等级序列优化,要么只单研究中低压配电网中的某一问题,比如停电损失成本最小或线损最小,要么就针对输配电网提出一种优化规划思想,比如分层分区电网优化等,但其缺乏操作可行性。在总结上述优点与不足后,基于大型电网优化规划需满足的安全、经济、可靠三大基本要求,也即电网生产运行基本要求,提出应用最小生成树(MST)结合改进遗传算法(IGA)进行多目标电网优化规划,并取得了很好的实际效果^[1]。

1 基于最小生成树的优化数学模型

电网中包含了众多节点和线路,还包含了一些重要的运行参数。下面用集合的思想将它们描述出来,

便于在后面方便运用。

$$S = \{S_1, S_2 \cdots S_n\}; N = \{N_1, N_2 \cdots N_n\};$$

$$P_L = \{P_{L1}, P_{L2} \cdots P_{Ln}\}$$

$$B = \{B_1, B_2 \cdots B_n\}; H = \{H_1, H_2 \cdots H_n\};$$

$$W = \{W_1, W_2 \cdots W_n\}$$

$$L = \{L_1, L_2 \cdots L_n\}; P = \{P_1, P_2 \cdots P_n\};$$

$$Q = \{Q_1, Q_2 \cdots Q_n\}$$

$$U = \{U_1, U_2 \cdots U_n\}; P_1 = \{P_{11}, P_{12} \cdots P_{1n}\};$$

$$I_k = \{I_{k1}, I_{k2} \cdots I_{kn}\}$$

电源集合: S包含了电网中从不同电压等级线路将电能输送到变电站的电厂;

节点集合: N包含了 10 kV 配变节点、35 kV 节点 C_{n1}、110 kV 节点 C_{n2}、220 kV 节点 C_{n3}、500 kV 节点 C_{n4};

负荷集合: P_L包含了电网中的负荷点或大用户。负荷点由负荷预测结果决定负荷分布及其大小;

支路集合: B包含了电网中已有线路及所有可能待建线路;

支路回数集合: H包含了具体的任意两节点之间

线路的回路数,通常取 0、1、2 数值;

权重集合: W 包含了各支路侧重于某一优化目的的权重数值序列;

长度集合: L 包含了各支路的长度;

潮流集合: $P、Q$ 包含了各支路有功、无功潮流数值;

电压集合: U 包含了各节点电压幅值;

线损集合: P_l 包含了各支路的线损数值;

短路电流集合: I_k 包含了各节点的短路电流数值。

优化目标函数为

$$f = \sum_{i=1}^{N_b} W_i L_i H_i + P_r T \sum_{i=1}^{N_b} k_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} r_i \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i I_{k_i} \quad (2)$$

$$f = \sum_{i=1}^N W_i H_i (P_i - P_{\max}) + K \quad (3)$$

$$\min f = \lambda_1 f + \lambda_2 f + \lambda_3 f \quad (4)$$

经济性目标函数 f 表示按投资权重偏向线路投资费用和线损费用之和, k_i 为修正系数, 节点 ij 之间存在支路取 1 否则取 0, P_r 为线损单价 (万元 /kWh), T 为运行小时数; 安全性目标函数 f 表示按节点权重偏向各节点平均短路电流水平之和; $N-1$ 可靠性目标函数 f 表示按 $N-1$ 校验时支路过负荷之和, K 为一较大正数值。全局优化目标函数 f 表示综合电网安全、经济、可靠性要求下的综合目标函数。其中 $\lambda_1、\lambda_2$ 和 λ_3 为反映电网投资运营经济性、可靠性和安全短路电流水平偏好的权重, 且 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ 。这里考虑到电网安全第一、经济第二和可靠性第三的原则, 分别取 $\lambda_1 = 0.5、\lambda_2 = 0.1、\lambda_3 = 0.4$ 。另外选取 2 种权重系数作对比方案, 即 $\lambda_1 = 0.5、\lambda_2 = 0.2、\lambda_3 = 0.3$ 和 $\lambda_1 = 0.3、\lambda_2 = 0.1、\lambda_3 = 0.6$ 。

2 基于 IGA 的电网网架优化算法^[2,3]

2.1 编码方法

将原始节点及支路庞大的网络化简并对节点编号, 然后把每个支路看成一个基因, 全网络的支路选建状态为一个染色体, 染色体段的长度为编码支路中的支路数目。通过改变电力网网架结构来达到优化的目的, 故在编码方式上抛弃传统对所有支路采用二进制编码, 即编码中的“1”表示某支路闭合, “0”表示某支路断开的方法。而是采用十进制编码方式, 染色体长度等于可选建支路数 (38) 和已有支路数 (8) 的

和, 染色体长度为 46。十进制编码方式缩短了染色体长度, 节省了繁殖操作时间。由于基因值本身就是支路数, 不用再去编码解码, 也提高了计算速度。

2.2 种群规模

这里的基因个数就是简化系统中的编码可待建支路的个数, 一组基因一起构成染色体, 每个染色体都代表一种网络拓扑结构。不同的染色体一起构成种群。采用的种群规模数等于电力网中待建支路的个数 (38)。

2.3 适应度函数

由于优化的综合目标函数是极小值函数, 而遗传算法的适应度函数是最极大值函数。为了解决这个问题, 构造出遗传算法的适应度函数如下。

$$F(x) = \frac{1}{f(x)} \quad (5)$$

式中, $f(x)$ 为电力网网架全局优化综合优化目标函数。

2.4 遗传算子

常用选择的方法有比例选择法、最优保存法、随机联赛选择法等, 其中最易使用容易被理解的是比例选择法。这种方法是利用各个个体适应度函数值在整个适应度函数值的比例的概率来决定其后代的遗传可能性。上一代中某一个体被选中的概率用公式可以表示为

$$P_{si} = \frac{F_i}{\sum_{p=1}^N F_p} \quad (6)$$

其中, P_{si} 为个体 i 被选中遗传到下一代的概率; F_i 为个体 i 的适应度函数值; N 为群体中的个体数目。

在基因交叉和变异操作过程中使用自适应的遗传算子操作, 根据个体适应度值由大到小的排列顺序的变化而变化的基因交叉率和变异率。采用的基因交叉率和变异率计算公式分别为

$$P_c = \begin{cases} P_{cl} \frac{P_{d1} - P_{d2}}{\frac{P_{\max}}{2}} \left(\frac{P_{\max}}{2} - X(g) + 1 \right) & X(g) \leq \frac{P_{\max}}{2} \\ P_c = P_{cl} & X(g) > \frac{P_{\max}}{2} \end{cases} \quad (7)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} \frac{P_{m1} - P_{m2}}{\frac{P_{\max}}{2}} \left(\frac{P_{\max}}{2} - X(g) + 1 \right) & X(g) \leq \frac{P_{\max}}{2} \\ P_m = P_{m1} & X(g) > \frac{P_{\max}}{2} \end{cases} \quad (8)$$

式中 P_{op} 为种群规模数; P_{c2} 和 P_{m1} 分别为对应于种群中最小适应度值的个体交叉率和变异率; P_{c1} 和 P_{m2} 分别为对应于种群中最大适应度值的个体交叉率和变异率; $X(g)$ 为个体 g 在种群中所对应的序号值。根据文献 [4], 操作中宜取 $P_{c1}=0.9$, $P_{c2}=0.6$, $P_{m1}=0.1$, $P_{m2}=0.01$ 。

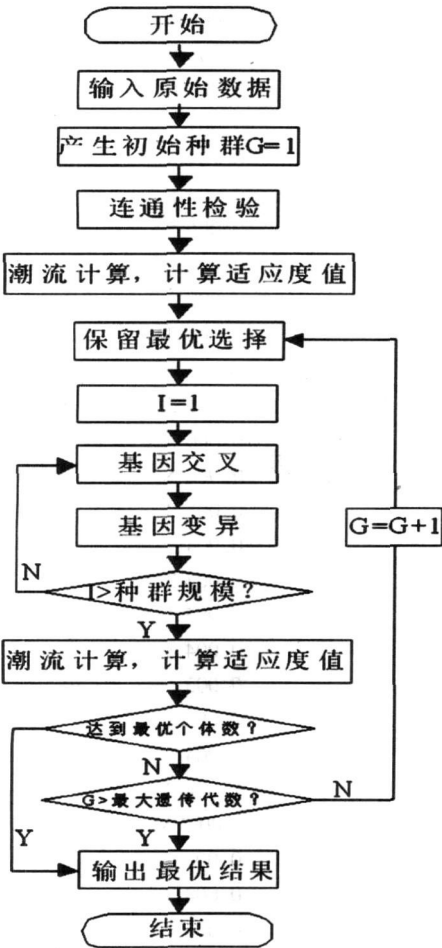


图 1 优化流程图

全局电力网网架优化流程图 1。

3 算例分析

应用规划中的一个实例去验证所述改进遗传算法的正确性和合理性。现状年电力网网架包含 2 座 500 kV 站、2 座 220 kV 站、5 座 110 kV 站; 电力平衡后规划目标年电力网网架包含 2 座 500 kV 站、7 座 220 kV 站、16 座 110 kV 站和 3 座 35 kV 站。再将系统各电压等级归一化处理, 系统总共 28 个节点、58 条线路 (含双回线路), 待选建线路数 50 条。图 2 中总共 46 条支路, 除去已有 8 条支路, 最后得到待选支路数 38 条。表 1 包含已有支路和待建支路全体的编号。

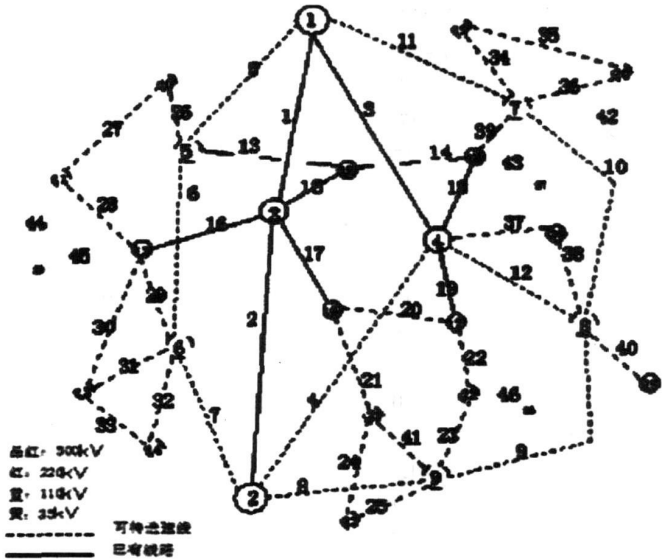


图 2 待优化电力网架图

3.1 计算方法及参数

采用 Matlab 遗传算法工具箱及其潮流计算程

表 1 待优化电力网支路线路编号表

支路号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
待选建线路数	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	0	0
支路号	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
待选建线路	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
支路号	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	—	—
待选建线路	1	2	1	2	1	1	1	2	1	1	2	1	2	2	—	—

表 2 已知节点参数

(单位: 万 kW)

节点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
发电机出力	25	30	0	0	8	6	0	4	0	0	1	0.5	0	0.4	0
负荷	0	0	0	0	3	2	3	4	2	5	4	3	5	4	5
节点号	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
发电机出力	0	0	0	2	0	0	0	1	2	1	0	0	0	—	—
负荷	5	4	4	5	3	3	3	4	5	5	0.5	0.4	0.4	—	—

表 3 已知支路参数 (单位: 万 kW、万 kVA、km)

支路	首末节点	传输容量	原有线路	可选建条数	长度	电阻 / Ω	电抗 / Ω
1	1—3	25	1	0	80	0.009 6	0.052 2
2	2—3	25	1	0	120	0.014 4	0.078 3
3	1—4	25	1	0	90	0.010 8	0.058 8
4	2—4	25	0	1	100	0.012 0	0.065 3
5	1—5	25	0	2	65	0.007 8	0.042 4
6	5—6	25	0	2	65	0.007 8	0.042 4
7	2—6	25	0	2	55	0.006 6	0.035 9
8	2—9	25	0	2	50	0.006 0	0.032 6
9	8—9	25	0	2	55	0.006 6	0.035 9
10	7—8	25	0	2	60	0.007 2	0.039 2
11	1—7	25	0	2	65	0.007 8	0.042 4
12	4—8	25	0	1	55	0.006 6	0.035 9
13	5—15	12	0	1	45	0.006 5	0.037 2
14	15—18	12	0	1	50	0.007 2	0.041 3
15	3—15	12	1	0	40	0.005 8	0.033 1
16	3—12	12	1	0	45	0.006 5	0.037 2
17	3—16	12	1	0	45	0.006 5	0.037 2
18	4—18	12	1	0	45	0.006 5	0.037 2
19	4—17	12	1	0	45	0.006 5	0.037 2
20	16—17	12	0	1	45	0.006 5	0.037 2
21	16—21	12	0	1	40	0.005 8	0.033 1
22	17—22	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
23	22—9	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
24	21—23	12	0	1	35	0.005 1	0.028 9
25	23—9	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
26	5—10	12	0	1	25	0.003 6	0.020 7
27	11—10	12	0	1	35	0.005 1	0.028 9
28	11—12	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
29	6—12	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
30	13—12	12	0	1	40	0.005 8	0.033 1
31	13—6	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
32	14—6	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
33	14—13	12	0	1	25	0.003 6	0.020 7
34	19—7	12	0	2	30	0.004 3	0.024 8
35	19—20	12	0	1	45	0.006 5	0.037 2
36	7—20	12	0	2	30	0.004 3	0.024 8
37	4—24	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
38	8—24	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
39	7—18	12	0	1	20	0.002 9	0.016 5
40	8—25	12	0	2	20	0.002 9	0.016 5
41	9—21	12	0	1	30	0.004 3	0.024 8
42	20—27	6	0	1	30	0.005 0	0.029 8
43	18—27	6	0	2	20	0.003 3	0.019 8
44	11—28	6	0	1	25	0.004 1	0.024 8
45	12—28	6	0	2	30	0.005 0	0.029 8
46	22—26	6	0	2	16	0.002 6	0.015 9

序。运行环境为 Lenovo vista 2G内存@ CPU酷睿双核处理器 2×1.67。该电力系统基准电压为 220 kV, 基准容量为 100 MVA。最优个体最少保持代数 N为 10,最大遗传代数 G取 300。

3.2 计算结果分析

3.2.1 所提方法的计算结果

由表 4 可以得出,在 3 组确定权重系数下,每一确定权重系数下均有一个最优方案。在 3 个最优方案之间对比,方案 1 与方案 2 在经济性不变的条件下,方案 2 提高了可靠性从而提升了节点短路电流安全性,增加了新建线路数;方案 1 与方案 3 在可靠性不变的条件下,方案 3 减少了新建线路数,节约了投资费用即提升了经济性,从而大大牺牲了节点短路电流水平的安全性。

表 4 三方案计算结果对比表					
优化	新建	全局目标 f	经济性 f	可靠性 f	短路电流 f
方案 1	38	18.92	35.04	8.60	1.35
方案 2	44	18.96	35.04	5.52	1.71
方案 3	30	15.01	25.56	8.60	2.55

3.2.2 计算实时间比较

表 5 三方案计算时间对比表			
算法种类		二进制编码 (s)	十进制编码 (s)
方案 1	遗传算法	560	/
	改进遗传算法	380	200
方案 2	遗传算法	590	/
	改进遗传算法	420	230
方案 3	遗传算法	523	/
	改进遗传算法	358	189

采用改进遗传算法计算比遗传算法计算时间约少三分之一,而十进制编码比二进制编码计算时间节省了近一半。

3.2.3 收敛性比较

对改进遗传算法及遗传算法进行了收敛性的比较,优化对象为全局优化目标函数 f 结束准则为连续 10 代最优解无变化或者迭代次数大于 300 则结束迭代。如图 3、图 4、图 5 所示,改进遗传算法各代的解均优于遗传算法,并且经过几次迭代后即迅速收敛,从而更早搜索到最优解,三方案在第 130 代附近搜索到最优解;而遗传算法收敛速度慢,经过一段时间的迭代后,在最优解附近收敛速度下降,在第 200 代搜索到最优解。因此,无论是收敛速度还是搜索到的最优解,改进遗传算法均优于遗传算法。

4 结 语

算例取自龙泉驿区 500 kV 及以下电网优化规划实例,利用所介绍的电力网架优化方法,得出了在不同权重系数下的最优方案,最后分析了相应的计算结果。电力网架优化规划成果已经应用于该规划区域电力生产计划,同时也印证了该文优化算法的可行性。

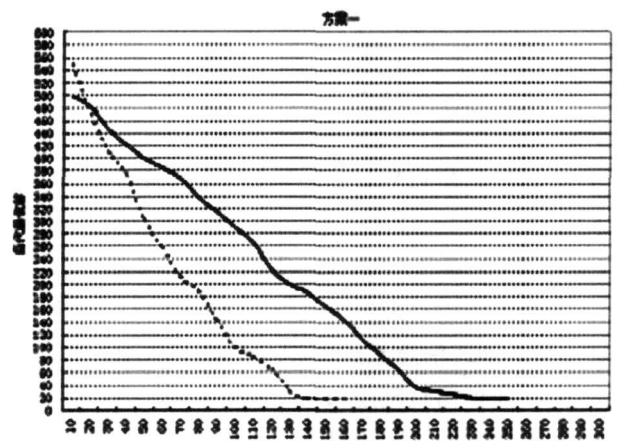


图 3 方案 1 收敛性比较图

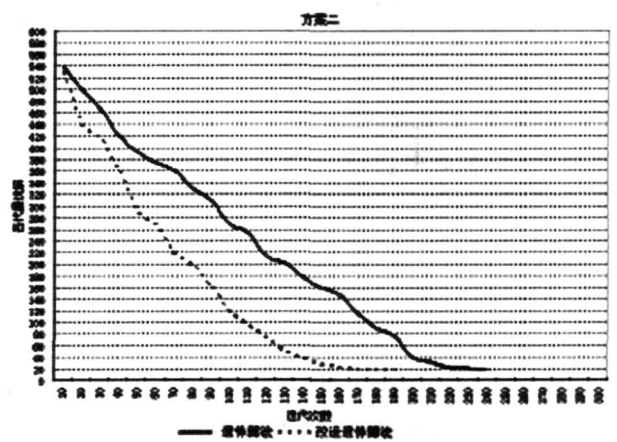


图 4 方案 2 收敛性比较图

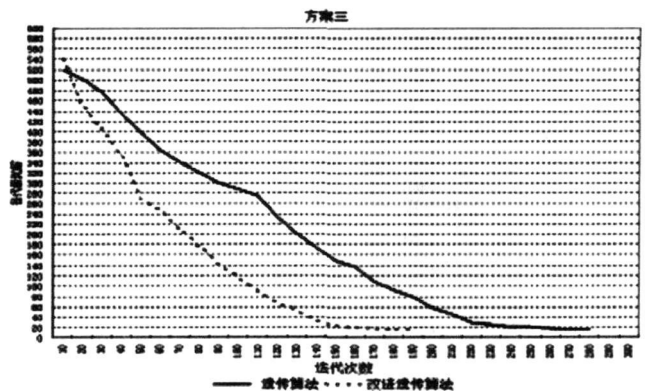


图 5 方案 3 收敛性比较图

参考文献

- [1] 王同文,许文格,管霖.电力网的网架结构优化规划方法[J].继电器,2005,33(21):63-69.
- [2] 李敏强,寇纪淞,林丹,等.遗传算法的基本理论与应用[M].北京:科学出版社,2002.
- [3] Goldbe DE. Genetic Algorithm in Search Optimization and Roaching Leaming[M]. Addison Wesley Company Inc

1985.

[4] 王小平,曹立明.遗传算法一理论、应用与软件实现 [M].西安:西安交通大学出版社,2002

作者简介:

吕后勇 (1982),男,硕士研究生,从事电力系统优化规划研究。

周步祥 (1965),男,博士,教授,从事电力系统调度自动化及计算机信息处理研究。

(收稿日期:2010—07—10)

(上接第 70 页)

析、操作开关、失电线路等。确定采纳方案后,可以通过手动遥控或批处理遥控实现方案的实施。

2.3 配电地理信息系统 (GIS)功能

配电地理信息系统 (GIS)包括图形功能,设备管理功能等。这些功能均是基于 ArcInfo平台基础上的地理信息系统上实现的。

(1)GIS图形功能 (AM)。此项功能是配网管理的基本功能,在 GIS背景基础上,可实现:

- 电子地图导入;
- 图形、图符编辑;
- 自动布置杆塔;
- 图形分层显示;
- 图形选择、漫游、缩放“鹰眼”功能;
- 图形定位:可以根据 GIS对象对 GIS图形进行图形定位;
- 图形信息的疏密效果协同矫正;
- 网络拓扑着色、供电电源分析、供电范围分析、停电范围分析;
- 图形测量:包括图形距离测量和面积测量;
- 图形打印:可以打印有地理背景的 GIS图。

供设备台帐的查询、统计和报表功能。

2.4 配电管理功能

配电工作管理子系统 (DM)是配网自动化系统的核心子系统,是配网自动化系统发挥配网调度管理自动化功能的重要组成部分。

配电工作管理子系统基于表单和工作流引擎驱动,其结构如图 2所示,与实时系统紧密相连,辅助电网调度计划人员完成各种纸张表单的审核处理过程,如设备检修申请单管理、调度计划管理等业务,将配调日常工作的大部分内容真正实现计算机管理,实现配电管理全过程的自动化,降低工作强度,提高工作质量。

3 结 论

该系统自 2010年 3月正式挂网投入运行以来,经过详细全面的系统测试,证明系统功能具有较高的可靠性,大大提高了绵竹地区汉旺新城的供电可靠性,在保证电压质量、降低电网网损起到了一定作用。汉旺新城配网自动化的投入运行,标志着四川电网配网自动化实用技术进入了一个新的阶段,为其他电力部门在实施同类型工程时,提供参考和借鉴作用。

参考文献

[1] 王海燕,曾江,等.国外配网自动化建设模式对我国配网建设的启示 [J].电力系统保护与控制,2009,37(11):125—129.

[2] 张荣坤 孙群中.现代通信技术 [M].北京:人民邮电出版社,2009.

[3] 王兴念,赵弈,等.配电自动化的实用设计 [J].电工技术,2004(7):30—33.

作者简介:

刘从洪 (1981),男,硕士,工程师,从事电网电力调度工作。

邓晓林 (1971),男,本科,工程师,从事电网电力调度工作。

(收稿日期:2010—05—19)

图 2 配电管理应用功能组成

(2)GIS设备管理 (FM),此项能够对配电设备,包括线路设备和变配电设备,进行管理和维护,并提

