

证据理论和层次分析法相结合的新农村电气化电能质量评估

杨丽徙¹, 郭建宇¹, 程杰²

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省电力公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 随着新农村电气化的发展, 农村电网的供电质量越来越受到人们的关注。根据新农村电气化电网的实际情况, 制定了电能质量综合评估的指标体系, 确定了指标量化方法和评判等级标准。鉴于 AHP 法确定权重时人为主观因素的影响较大, 在综合评估方法上提出了利用数据融合技术的 D-S 证据理论改进判断矩阵, 最大程度上消除了主观因素对评估的影响, 提高了评估结果的客观性。

关键词: 电能质量; D-S 证据理论; 层次分析法(AHP); 综合评估; 数据融合

Power quality evaluation of new rural electrification on D-S evidential theory and AHP

YANG Li-xi¹, GUO Jian-yu¹, CHENG Jie²

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Electric Power of Henan, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Together with the development of the new rural electrification, people pay more attention to the power quality of rural grid. According to the real situation of rural grid, this paper formulates the power quality evaluation index system, and determines the quantification method of indexes and the rank standards of judgment. Because there is too much subjective factor's influence in determining the weight of index by using AHP, this paper improves the judgment matrix by using D-S evidence theory — a data fusion technology, eliminates the influence of the individual factor to the result of the evaluation in the greatest degree, and enhances the objectivity of the evaluation's result.

Key words: power quality; D-S evidential theory; analytic hierarchy process(AHP); synthetic evaluation; data fusion

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)14-0026-05

0 引言

随着新农村电气化建设的蓬勃开展, 农村负荷对电能质量的要求也越来越高, 对农村电网的电能质量做出综合评估, 合理定位, 将为其安全、优质、经济运行和发展提供科学的辅助决策依据。

目前, 电能质量综合评估方法主要包括基于概率统计与矢量代数的方法、基于模糊数学的方法、概率论与模糊数学相结合的方法、层次分析法与模糊数学相结合的方法等^[1]。文献[2,3]提出采用模糊综合评价方法对电能质量进行评估, 给出了各项电能质量指标的模糊模型, 形成了隶属度集, 根据择近原则来判断电能质量等级, 但未说明如何确定权重; 在模糊理论的基础上, 文献[4,5]结合层次分析法 AHP (Analytic Hierarchy Process) 处理权重问题, 但由于 AHP 法确定的权重为主观权重, 客观性较

差, 不随实际指标值的大小变化, 不利于电能质量的客观评价, 很多学者提出了异议。

论文从 AHP 法主观因素影响的根源出发, 提出利用 D-S 证据理论中的数据融合思想, 结合多专家的意见改进 AHP 法的判断矩阵, 克服传统 AHP 方法求取权重的主观局限性, 以避免个人的意志左右评估结果。

1 电能质量评估指标体系的构建

电能质量主要包括电压质量、频率质量和供电可靠性三方面。频率质量主要以频率偏差来衡量, 可靠性指标主要考虑系统的供电可靠率。电压质量涉及的指标较多, 可分为稳态电压质量和暂态电压质量两部分, 稳态电压质量包括电压偏差、电压波动和闪变、电压波形畸变以及三相电压不平衡度等方面; 暂态电压质量包括暂降、暂升、瞬间中断、暂时过电压和瞬态过电压、脉冲等方面^[4]。

随着新农村电气化建设的发展, 农村电网的负

荷已从生产和照明用电为主发展为工业、商业、居民生活用电等多种成分组成,但工业用户仍很少涉及精密加工行业,对电能质量的敏感度较城市供电低,特别是暂态电压质量指标对用户的影响不大。

综合国家电网公司对县、乡、村新农村电气化建设自评标准的指标要求,涉及电能质量的主要有频率偏差,电压偏差,电压波形畸变率,供电可靠性等方面。考虑到县、乡、村三级供电的电压等级不同,评估指标体系见图1。

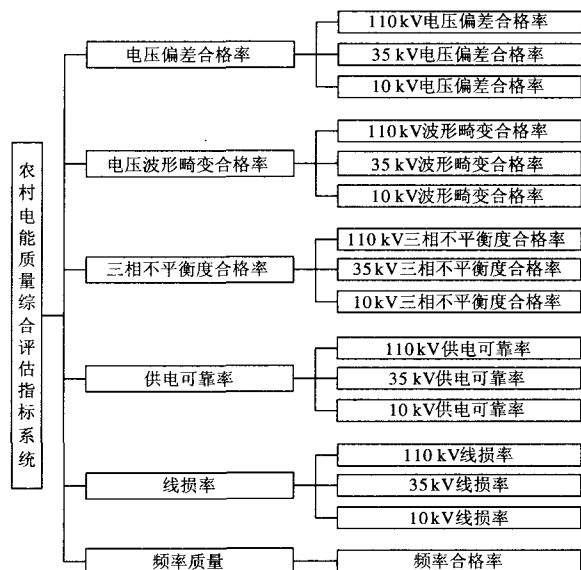


图1 新农村电气化电能质量评估指标体系

Fig.1 The index system of new rural electrification power quality synthetic evaluation

2 单项评估指标的确定

2.1 各指标的定量计算

全国电压电流等级和频率标准化技术委员会对电压偏差、频率偏差、谐波、电压三相不平衡、电压波动与闪变等六项指标颁布了国家标准^[7]。所有电能质量监测数据按照国家标准考核。论文以合格率的形式统计相关指标,即:

① 频率合格率=

$$\left(1 - \frac{\text{频率超上限时间} + \text{频率超下限时间}}{\text{频率监测总时间}}\right) \times 100\%$$

② 电压合格率= $(1 - \sum \text{各监测点超偏差时间} / \sum \text{监测运行时间}) \times 100\%$

③ 电压波形畸变率的合格率= $(\text{波形畸变率合格的母线条数} / \text{运行的母线总条数}) \times 100\%$

④ 三相不平衡度合格率= $(1 - \sum \text{各监测点不平衡度超偏差时间} / \sum \text{监测运行时间}) \times 100\%$

⑤ 供电可靠性以RS3计算,指不计系统电源不

足限电。

$RS3 = [1 - (\text{用户平均停电时间} - \text{用户平均限电停电时间}) / \text{统计期间时间}] \times 100\%$

⑥ 统计线损率= $(\text{供电量} - \text{售电量}) / \text{供电量} \times 100\%$,不同电压等级的供电量与售电量释义见文献[8]。

2.2 指标等级的评判标准

根据国家标准对各电能指标的要求,并参考《国家电网公司县城电网建设与改造技术导则》、《农村电网建设与改造技术导则》等技术规程,各项指标评判等级按照五级划分,电压等级不同,指标要求也不同。以10kV电压等级为例,等级划分情况见表1。

表1 10kV电压等级电能质量指标分级标准

Tab.1 Evaluation standards of the index of 10kV

分级指标 I (%)	电能质量等级				
	合格			不合格	
	A级	B级	C级	I级	II级
电压合格率	≥97	≥96	≥95	≥94	<94
频率合格率	≥99.7	≥99.6	≥99.5	≥99.4	<99.4
电压波形畸变合格率	≥99	≥98	≥97	≥96	<96
三相不平衡度合格率	≥87	≥86	≥85	≥84	<84
供电可靠率	≥99.7	≥99.6	≥99.5	≥99.4	<99.3
线损率	≤7	≤7.5	≤8	≤9	≤10

评定标准以百分制计算。根据各指标的等级,确定分数 S_i ,A级为满分100,不合格的II级为20,依次递减。求得各指标在综合评估中的权重 W_i ,最后得到的电能质量评估综合得分为 $Z = \sum S_i \times W_i$,作为电能质量评估结果。

3 电能质量综合评估方法的确定

在确定了一级指标的得分 S_i 后,下一步就是确定各个指标在整个综合评估中所占的权重,这是整个评估工作成败的关键。

AHP法是一种成熟的多目标决策方法,确定各指标间的权重关系,方法简便,易于实现,但作为一种主观赋权法,其决策结果会受到决策者主观认识范围的影响,如果能结合多领域专家的意见,取长补短,就可以大大降低个人主观意见对整个评估结果的影响,提高结果的可信度。而数据融合技术中的D-S证据理论是一种不确定性推理的人工智能方法,可以通过合并多重证据得出结论,对推理进行合理的信息论解释。

判断矩阵是应用AHP法的基础,也是其受主观影响的根源所在,论文利用D-S证据理论的融合

技术, 结合多位专家的意见修改判断矩阵, 以期最大程度的减小个人对整个评估结果的影响, 使结果更客观。

3.1 利用 D-S 证据理论改造判断矩阵

3.1.1 D-S 证据理论的基本概念

定义 1: 假设目前有一问题需要解决, 对于该问题我们所有能认识到的所以可能的结果的集合用 Θ 表示, 我们所关心的任一命题都对应于 Θ 的一个子集, 称 Θ 为一辨识框架, 代表所有可能辨识结果的集合, A 为 Θ 中的子集。

定义 2: 对于辨识框架 Θ , 2^Θ 为 Θ 的幂集, 如果映射 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ (将幂集中的集合映射到 0, 1 范围内) 满足条件:

$$m(\Phi) = 0; \sum_{A \subset \Theta} m(A) = 1 \quad (1)$$

则称 m 为辨识框架 Θ 的基本概率指派函数或基本可信度分配。

定义 3: 设 Θ 为辨识框架, 2^Θ 为 Θ 的幂集, 映射 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 为框架 Θ 上的基本可信度分配, 则称由

$$Bel(A) = \sum_{B \subset A} m(B) \quad (\forall A \subset \Theta) \quad (2)$$

所定义的函数 $Bel: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 为 Θ 上的信度函数。

定义 4: Dempster 合成法。设 Bel_1 和 Bel_2 是同一识别框架 Θ 上的两个信度函数, m_1 和 m_2 分别是其对应的基本可信度分配, 焦元分别为 $A_1, \dots, A_p$ 和 $B_1, \dots, B_q$, 若 $\sum_{A_i \cap B_j \neq \Phi} m_1(A_i)m_2(B_j) < 1$, 则定义

$m = m_1 \oplus m_2$ 为:

$$m(A) = (1 - K)^{-1} \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i)m_2(B_j) \quad (3)$$

其中: $K = \sum_{A_i \cap B_j = \Phi} m_1(A_i)m_2(B_j)$

由 m 给定的信度函数称为 Bel_1 和 Bel_2 的值和。

它可以推广至多个 m 函数和 Bel 函数的组合, 对于多个证据的合成运算 $m = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n$ 由式 (4) 表示:

$$m(A) = (1 - K)^{-1} \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = A} m_1(A_1)m_2(A_2) \dots m_n(A_n) \quad (4)$$

其中: $K = \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = \Phi} m_1(A_1)m_2(A_2) \dots m_n(A_n)$

3.1.2 改造判断矩阵

用 D-S 证据理论处理指标的方法, 首先要由多位专家独立的对评估指标间的重要性做出评估。根据不同的评估结果, 求取每个相关因素的综合评估,

这属于数据融合中像素级数据融合的范畴。

AHP 法的判断矩阵是将指标 i 与指标 j 相互比较, 按照九级标度法对其重要程度 a_{ij} 定义, 从而形成一个正互异矩阵, 因此 D-S 证据理论的标度框架定为 $\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7, \theta_8, \theta_9, \theta_{10}, \theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{14}, \theta_{15}, \theta_{16}, \theta_{17}\}$, 其中 $\theta_1=9, \theta_{17}=1/9$, 有 $\theta_1 > \theta_2 > \dots > \theta_{17}$, θ_1 到 θ_{17} 分别代表“很好”到“很差”, 符号 $>$ 代表“优于”。

一般情况下, 专家的判断并不是完全准确的, 他对自己的判断也不可能百分百的肯定, 但总体来说偏差不会太大, 比如, 不可能既认为 $a_{ij}=2$, 又认为 $a_{ij}=1/2$, 也就意味专家意见的结果应该是在一个值的附近变动的, 同时也要考虑到专家对情况的不确定性。如果一个焦元 θ_i 是专家的判断评语, 就让专家给出他对 θ_i 的信任程度 α ; 如果对自己的判断结果不确定, 还可以给出对该指标不确定的信任度, 即对整个评语框架 Θ 信任度。

对于来自不同数据源的单个数据, 根据式 (1) ~ (3) 可以综合求出新的基本概率指派函数 $m(A)$ 。现有一组数据, 定义专家 1 和专家 2 的意见分别为信度函数 Bel_1 和 Bel_2 , m_1 和 m_2 分别是其对应的基本概率指派函数, 焦元为九级标度, 专家对各焦元的信度如表 2 所示。

表 2 专家判断信度表

评判等级	专家 1 对判断的信度	专家 2 对判断的信度
θ_1	0.1	0.1
θ_2	0.5	0.6
θ_3	0.3	0.2
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
θ_{17}	0	0
不确定 (Θ)	0.1	0.1

由式(3)的分母项表达式可得, $1-K=0.56$ 。

其分子的计算结果及代入式(3)归一化处理后, 像素级数据融合结果见表 3。

表 3 像素级数据融合结果

直和项	式(3)分子计算值	数据融合结果
$m(\theta_1)$	0.03	0.053 6
$m(\theta_2)$	0.41	0.732 1
$m(\theta_3)$	0.11	0.196 4
$m(\theta_4)$	0	0
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$m(\theta_{17})$	0	0
$m(\Theta)$	0.01	0.017 8

由表 3 可以观察到, 在像素级数据融合过程中,

通过证据合成实现了证据理论的极化作用,对评价指标“ θ_2 ”的支持增加了,放大了专家们持相同意见的评价值,缩小了专家们持不同意见的评价值。取像素级数据融合结果中的最大值为其量化结果。

3.2 基于 AHP 法求取指标权重

AHP 法基本思路就是“先分解后综合”,先将决策者对同一层次上 n 个元素优劣的整体判断转变为对这 n 个元素的两两比较,然后再转为对这 n 个元素的整体优劣排序判断即确定各元素的权重,其应用步骤可归纳为以下四步。

(1) 分析目标问题,把问题条理化、层次化,建立递阶层次结构。

(2) 构造判断矩阵。

(3) 目标一致性检验:对于判断矩阵 A ,如果对所有 $i, j, k=1, 2, \dots, m$, $a_{ij}=a_{ik}/a_{jk}$ 成立,则称 A 为一致矩阵。一般来说,通过两两比较得到的判断矩阵可以满足判断矩阵的互反性条件,但不一定满足一致性。AHP 法引入变量 CI 作为衡量判断矩阵偏离一致性的指标。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1} \quad (5)$$

当阶数大于 2 时, CI 与同阶平均随机性一致性指标 RI 之比称为随机一致性比率,记为 CR ,即 $CR=CI/RI$ 。1~10 阶判断矩阵的 RI 值可查表求得^[9]。当 CR 在 0.1 左右时,一般认为判断矩阵具有满意的一致性,在某些情况下可以放宽。但超过比值后,就必须调整判断矩阵,使之符合一致性要求。

(4) 权重计算:可以证明,当矩阵 A 满足一致性要求时, A 有最大特征值 $\lambda_{\max}=m$, $\lambda_{\max}$ 对应的特征向量归一化后即各要素层的权重向量。这样我们可以计算出某一层的 m 个元素对上一层任一单个目标的权重分配 $u_i\{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 。

评估的目标是得到最底层元素(方案层)各指标对于最高层(目标层)相对重要性的权值,称为综合权重,这一过程要由高层次到低层次逐层进行的。假设最高层下一级的中间层 P_1 包含 n 个元素 a_i , $i=1, 2, \dots, n$, 其相对最高层的权重分配对应为 $w_1\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$; P_1 下一级的层 P_2 有 m 个元素 b_j , $j=1, 2, \dots, m$, 元素 b_j 相对 P_1 层各指标的权重分配为 $w_2\{b_{j1}, b_{j2}, \dots, b_{jn}\}$, 则 b_j 对于最高层的权重为:

$$w_j = \sum_{i=1}^n a_i b_{ji} \quad (6)$$

依此向下计算,可得出最底层指标相对目标层的综合权重。

4 算例分析

指标的两两判断矩阵已由专家给出,运用 D-S 证据理论的数据融合方法可以处理多位专家的意见,因篇幅有限,在此不再叙述。对图 1 中间层指标供电可靠率,电压偏差率,波形畸变率,三相不平衡度,频率偏差及线损率的重要性判定最终可以得到如下正互异矩阵 $A[a_{ij}]_{n \times n}$, 其中 $n=6$ 。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 3 & 2 & 6 \\ 1/2 & 1 & 3 & 3 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1/2 & 1/2 & 1 & 3 \\ 1/6 & 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

应用最大特征值法,求得中间层各指标的权重为 $w_1=(0.335\ 4, 0.227\ 2, 0.126\ 7, 0.126\ 7, 0.128\ 0, 0.055\ 9)$ 。继续计算,求出最底层对中间层各指标的权重分配依次为 $w_{21}=(0.539\ 6, 0.297\ 0, 0.163\ 4)$, $w_{22}=(0.5, 0.25, 0.25)$, $w_{23}=(0.333, 0.333, 0.333)$, $w_{24}=(0.539\ 6, 0.297\ 0, 0.163\ 4)$, $w_{25}=(1)$, $w_{26}=(0.163\ 4, 0.297\ 0, 0.539\ 6)$ 。

由式(6)可得,最底层对目标层的权重为 $W=(0.181\ 0, 0.099\ 6, 0.054\ 8, 0.113\ 6, 0.056\ 8, 0.056\ 8, 0.042\ 2, 0.042\ 2, 0.042\ 2, 0.068\ 4, 0.037\ 6, 0.020\ 7, 0.128\ 0, 0.009\ 1, 0.016\ 6, 0.030\ 2)$ 。

两个待评估网络的监测数据如表 4 所示。

表 4 待评网络的数据值

Tab.4 Illustrative PQ evaluation

评估指标 /(%)	电压 /kV	网络 A		网络 B	
		监测 数据	评定 等级	监测 数据	评定 等级
供电 可靠率	110	99.88	A	99.89	A
	35	99.83	A	99.80	A
	10	99.81	A	99.68	B
电压偏差 合格率	110	97.76	B	98.16	A
	35	97.67	B	97.85	B
	10	96.26	B	96.65	B
三相电压不 平衡合格率	110	95.21	A	95.16	A
	35	91.33	B	92.45	A
	10	85.69	C	86.84	B
电压波形 畸变合格率	110	97.62	C	98.26	B
	35	95.68	II	96.32	I
	10	97.75	C	97.67	C
线损率	110	6.77	C	6.21	B
	35	6.86	C	6.58	C
	10	8.61	I	7.98	C
频率合格率		99.92	A	97.89	A
电能质量综合评估得分		84.264		89.080	

由结果可知,网络B的电能综合质量要高于网络A的电能综合质量。在比较整体质量的过程中,通过等级的划分和数据的对比,也可以发现网络中存在的问题,如网络A的电压合格率不理想,可以考虑在网络中相应地增加调压手段及无功补偿设备;三相不平衡较严重,同时线损也相对较大,就需要从网架方面进行思考。

5 结论

论文从当前农村用电负荷的特点出发,提出了适合新农村电网实际情况的电能质量评估指标体系,确定了单个指标计算公式及评判标准;在对电能质量进行综合评估时,利用AHP确定指标权重。考虑到AHP作为主观赋权法的弱点,结合D-S证据理论的数据融合技术对判断矩阵进行改进,融合多人的判断意见,提高了结论的客观性。算例结果表明,证据理论与层次分析相结合的新农村电气化电能质量评估方法更客观更科学。

参考文献

- [1] 金焱,刘颖英,徐永海.电能质量综合评价的分析与研究[J].电气技术,2006,1:27-30.
JIN Yan,LIU Ying-ying,XU Yong-hai. Analyse and Research on the Comprehensive Evaluation of the Power Quality[J]. Electrical Engineering,2006, 1:27-30.
- [2] 贾清泉,宋家骅,兰华,等. 电能质量及其模糊方法评价[J]. 电网技术,2000,24(6):46-49.
JIA Qing-quan,SONG Jia-hua,LAN Hua,et al. Power Quality and Fuzzy Method Evaluation[J].Power System Technology,2000,24(6):46-49.
- [3] 唐会智,彭建春. 基于模糊理论的电能质量综合量化指标研究[J].电网技术,2003,27(12):85-88.
TANG Hui-zhi,PENG Jian-chun.Research on Synthetic and Quantificated Appraisal Index of Power Quality Based on Fuzzy Theory[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 85-88.
- [4] 赵霞,赵成勇,贾秀芳,等. 基于可变权重的电能质量模糊综合评价[J].电网技术,2005,29(6):11-16.
ZHAO Xia,ZHAO Cheng-yong,JIA Xiu-fang,et al.Fuzzy Synthetic Evaluation of Power Quality Based on Changeable Weight[J]. Power System Technology, 2005,29(6):11-16.
- [5] 谭家茂,黄少先. 基于模糊理论的电能质量综合评价方法研究[J].继电器,2006,34(3):55-59.
TAN Jia-mao,HUANG Shao-xian. Research on Synthetic Evaluation Method of Power Quality Based on Fuzzy Theory[J].Relay,2006,34(3):55-59.
- [6] 韩正伟,林锦国,邵如平.模糊多目标决策理论在电能质量综合评价中的应用[J].继电器,2007,35(10):33-36.
HAN Zheng-wei,LIN Jin-guo,SHAO Ru-ping. Application of Fuzzy Multi-objective Decision Making Theory in Synthetical Evaluation about Power Quality[J].Relay, 2007,35(10):33-36.
- [7] 林海雪. 现代电能质量的基本问题[J].电网技术, 2001, 25(10):5-12.
LIN Hai-xue.Main Problems of Modern Power Quality[J].Power System Technology,2001,25(10):5-12.
- [8] 国家电网公司.新农村电气化标准体系[Z].2007.
State Grid Corporation of China.The Standard System of New Rural Electrification[Z]. 2007.
- [9] 王建曠,李威,纪延超,等. 电能质量监测算法研究及实现[J].继电器,2001,29(2):29-31.
WANG Jian-ze, LI Wei, JI Yan-chao,et al. The Study and Realization of Power Quality Supervisory Method[J].Relay, 2001,29(2):29-31.
- [10] 李连结,姚建刚,龙立波,等. 组合赋权法在电能质量模糊综合评价中的应用[J].电力系统自动化, 2007, 31(7): 32-35.
LI Lian-jie, YAO Jian-gang, LONG Li-bo, et al. Application of Combination Weighing Method in Fuzzy Synthetic Evaluation of Power Quality [J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(7):32-35.
- [11] 张阳,何正友,林圣.一种基于DS证据理论的电网故障诊断方法[J].继电器,2008,36(9):5-10.
ZHANG Yang,HE Zheng-you,LIN Sheng. A Power System Fault Diagnosis Method Based on DS Evidence Theory [J].Relay,2008,36(9):5-10.
- [12] Zhu H, Basir O.A Scheme for Constructing Evidence Structures in Dempster-Shafer Evidence Theory for Data Fusion[A]. in:IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation[C].2003.960-965.
- [13] Dell'Aquila A, Marinelli M, Monopoli V G. New Power Quality Assessment Criteria for Supply Systems under Unbalance and Nonsinusoidal Conditions[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2004,19(3): 1284-1290.

收稿日期: 2008-08-27; 修回日期: 2009-05-05

作者简介:

杨丽徒(1956-),女,教授,博士,主要从事电力系统运行与规划、电力GIS应用方面的教学与研究;

郭建宇(1982-),男,硕士研究生,主要从事电力系统运行与规划方面的研究; E-mail: guojyu2000@yahoo.com.cn

程杰(1971-),男,高级工程师,主要从事电力系统运行与规划管理方面的研究。