

考虑谐波响应率的电能表谐波误差修正

张勇军, 石辉

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 通过对感应式和电子式电能表的计量原理及谐波误差的分析, 确定以电能表准确计量基波电能为标准; 引入谐波响应率的概念, 指出电能表谐波响应率与谐波误差的关系。针对两种电能表对各次谐波的响应特性, 结合流经电能表的各次谐波电压、电流的含量和功率角等参数, 建立适用于系统实际的谐波响应率模型。借助统计数据计算模型系数, 确定谐波响应率表达式, 并以此修正电能表所测全波电量, 剔除谐波误差, 实现准确基波电量的计量。

关键词: 电能表; 谐波响应率; 功率角; 误差

Harmonic error modifying of electric energy meter considering harmonic responsivity

ZHANG Yong-jun, SHI Hui

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: By analyzing measure principle and harmonic error of inductive and electronic energy meter, fundamental wave power is ascertained as accurate measure standard of electric energy meter. Harmonic responsivity is introduced, and at the meantime, the relationship between harmonic responsivity and harmonic error is presented in this paper. Model of the harmonic responsivity applicable for actual system is established according to different characteristics that two types of meters can reflect on various harmonics combined with harmonic voltage, current and power angle, whose coefficients are calculated by virtue of statistic data to confirm the expression. Thus, the fundamental wave power can be measured accurately through correcting full-wave power quantity measured by electric energy meter with the harmonic error minimizing.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50337010).

Key words: electric energy meter; harmonic responsivity; power angle; error

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)22-0058-04

0 引言

随着电力电子技术的迅猛发展, 特别是各种整流设备的广泛应用, 电网中的谐波成分日益增长。以电弧炉、家用电器及大功率整流器件等为代表的谐波源广泛分布且难以管理, 导致各地电网谐波情况各异, 总体上日趋严重。谐波不仅给电网带来运行不安全因素增多、功率损耗增加、设备寿命缩短等不良影响, 而且给电能计量带来不可忽视的误差, 导致供用电部门电能计费失准。

目前虽然高精度的电子式电能表已开始应用于生产实际, 但大量用户, 特别是谐波集中的低压用户仍使用感应式电能表或普通电子式电能表。全部更换显然不切实际, 因此希望能直接将现有表计的测量数据加以修正以消除谐波误差。由于系统中谐

波测量的复杂性和数据的有限性, 一直以来相关研究只能通过实验得出单次谐波的误差影响^[1~3], 或只做理论分析, 均缺乏对实际应用的指导意义。本文考虑系统实际各次谐波的综合影响, 分析谐波误差产生的原因, 并引入电能表谐波响应率的概念。通过可测的基波和各次谐波电压、谐波电流及其功率角关系, 分别建立针对感应式和电子式电能表的谐波响应率模型, 以此反映谐波电量成分。对测得的全波电量数据用谐波响应率参数加以修正, 剔除其中的谐波电量, 可有效减小电能表的谐波误差, 从而准确描述基波电量。

1 电能表的谐波误差产生原理

据调查, 目前我国关口及大用户普遍采用电子式电能表, 低压居民用户主要采用感应式电能表^[3], 两种表计均处于谐波环境中, 应分别予以考查。

目前, 关于谐波环境下的电能计量标准, 还没

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50337010)

有统一的规定。主流观点认为, 以电能表准确反映基波电能为计费标准是比较合理且可行的。

由感应式电能表的结构可知, 电能表接入电路后, 输入的电压和电流分别产生各自的电压磁通和电流磁通, 交变磁通穿过转盘而产生涡流, 涡流相互作用在转盘中产生一个驱动转矩 M ; 为了使转盘能匀速转动, 在转盘上附加了一个永久磁铁, 产生制动力矩 D 。当转盘转速与所测电能保持一致关系, 转盘以一定转速 V 匀速转动时, $D=M$ 。此即感应式电能表的工作原理^[4]。由于感应式电能表是针对计量基波电能设计, 只能准确计量基波分量。

电子式电能表计量有功采用的是 A/D 采样数值计算的方法^[5]。设交流电源电压、电流的瞬时值为 $u(t)$, $i(t)$, 则瞬时功率 $P(t)$ 及一个周期内平均功率 P 分别为:

$$P(t) = u(t)i(t) \quad (1)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u(t_k)i(t_k) \quad (2)$$

式(2)中 N 表示把周期 T 离散化为 N 等份。在谐波环境中 $u(t)$, $i(t)$ 可表示为各次谐波分量的叠加, 而只有同频率的电压与电流谐波才构成平均功率。电子式电能表具有宽频带响应特性, 因此, 理论上电子式电能表所反映的平均功率 P 可表示为:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos \theta_n = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad (3)$$

实际应用中两种电能表反映的电能值均可表示为:

$$P = P_1 + \sum_{n=2}^{\infty} K_n P_n \quad (4)$$

其中: P , P_1 , P_n 分别为电能表测得的全波电能值, 通过的基波电能值和 n 次谐波电能值; K_n 为电能表对 n 次谐波的响应系数, K_n 的大小及正负受 n 值大小, n 次谐波的流向及功角关系等影响。

系统中, 电力用户按负荷特性可分为非线性用户和线性用户。非线性用户将所吸收的基波电功率的一部分转化为谐波功率反送回系统, 导致其计费电量小于实际吸收的基波电量, 售电部门蒙受损失; 线性用户吸收基波功率的同时, 被迫吸收有害的系统背景谐波, 导致其计费电量大于实际吸收的基波电量, 线性用户蒙受损失。可见, 依据电能表所测的全波电能计费不合理。如果将其中的谐波电量视为计量误差, 通过剔除谐波成分, 按基波电量计费, 就能保证公平合理。因此谐波误差被定义为:

$$\Delta A = A - A_1 = \int P dt - \int P_1 dt = (P - P_1)T = \Delta PT \quad (5)$$

$$\Delta P = P - P_1 = \sum_{n=2}^{\infty} K_n P_n = \sum_{n=2}^{\infty} K_n U_n I_n \cos \theta_n \quad (6)$$

式(5)中, T 表示电能计量时间。可见, 所求的谐波误差, 其大小等于电能表所反映的高次谐波有功电量之和。由于感应式和电子式电能表计量原理及频率特性不同, 导致两种表计对谐波的响应情况不同, 所取 K_n 也不相同, 误差系数应分别选取。

2 谐波响应率

2.1 谐波响应率概念

理论上, 谐波误差等于电能表所响应的总谐波电量。由于电能表测量精度有限, 且受自身频响特性限制, 一般只能准确响应谐波电量的大部分, $|K_n| \leq 1$ 。为区别谐波误差与谐波响应量的概念, 本文分别定义谐波响应量 A_H 和谐波响应率 $A_H\%$ 为:

$$A_H = \Delta A = \sum_{n=2}^{\infty} K_n U_n I_n \cos \theta_n T \quad (7)$$

$$A_H\% = \frac{A_H}{A_1} = \frac{\Delta P}{P_1} = \sum_{n=2}^{\infty} K_n \lambda_{\theta n} \gamma_n \beta_n \quad (8)$$

式中: $\lambda_{\theta n}$ 表示 n 次谐波的功角系数; $\gamma_n = I_n/I_1$, 为 n 次谐波电流含有率; $\beta_n = U_n/U_1$, 为 n 次谐波电压含有率。谐波响应率表征电能表测得的谐波电量相对基波电量的大小。

经验数据表明, 电能表带入功角偏移, 导致谐波功率因数与理论值略有不同, 故用 $\lambda_{\theta n}$ 替换 $\cos \theta_n / \cos \theta_1$ 。对感应式、电子式电能表以及对不同次数、不同功率角的谐波, 响应系数 K_n 和功角系数 $\lambda_{\theta n}$ 各不相同, 应分别予以选取。

实际系统中电压波形一般接近正弦波, 畸变量较小; 电流波形则畸变严重, 普遍含有奇次谐波, 特别是 3, 5, 7, 9 次谐波, 而所含偶数次谐波含量极少, 一般忽略不计。此外, 各谐波次数越高, 其含量越少^[6,7]。据此不妨简化谐波响应率表达式为:

$$A_H\% = \sum_{n=2j+1}^{\infty} K_n \lambda_{\theta n} \gamma_n \beta_n \quad (j=1, 2, 3, \dots) \quad (9)$$

2.2 响应系数

典型的感应式电能表频响特性曲线如图 1, 对不同次数的谐波响应情况各不相同。一般感应式电能表对 15 次及以上次数的谐波测量已不满足精度要求^[7], 而且高次谐波衰减很快, 可不予考虑。研究证实^[2,3], 对我国的负荷特性作加权统计处理, 得如下感应式电能表响应系数的经验数据: $K_3=0.74$, $K_5=0.5$, $K_7=0.28$, $K_9=0.25$, $K_{11}=0.22$, $K_{13}=0.16$ 。

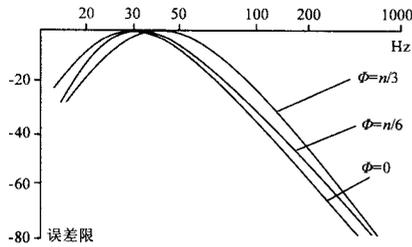


图 1 感应式电能表频响特性

Fig.1 Frequency responding characteristic of inductive meter

典型电子式电能表频响特性曲线如图 2, 以其宽频特性, 电能表能准确测量各阶次谐波。目前一般电子式电能表能计量 50 次以下的谐波电能。统计数据表明^[3,9], 对电子式电能表, 其响应系数可取为: $K_n=1.0, (n=3, 5, 7, 9, \dots)$

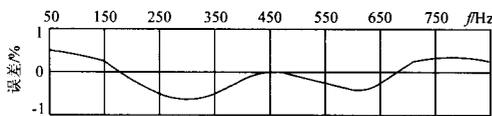


图 2 电子式电能表频响特性

Fig.2 Frequency responding characteristic of electronic meter

2.3 功角系数

谐波功角 θ , 即谐波电压与谐波电流的夹角。在谐波含量一定的条件下, 改变谐波功角 θ , 实际上改变了谐波功率的大小和方向。因此, 电能表谐波响应率的正负取决于谐波功角 θ 。

文献[3]进行了基波叠加 3 次谐波, $\cos\theta_1=1$, 且谐波电压、电流含有率均为 20% 时, 各种功角下电能的测量误差试验。将其代入谐波响应率公式

$$A_H \% = K_n \lambda_{\theta_3} \times 0.2^2 \quad (10)$$

得各自的功角系数 λ_{θ_3} , 汇总如表 1。

表 1 功角系数

Tab.1 Power-angle coefficient

$\theta_3 (^{\circ})$	感应式	电子式	感应式	电子式
	$A_H\%(%)$	$A_H\%(%)$	λ_{θ_3}	λ_{θ_3}
0	2.82	4.34	1.18	1.09
30	2.56	3.70	1.07	0.93
60	1.68	2.12	0.70	0.53
90	0.32	0.67	0.13	0.17
120	-1.54	-1.86	-0.64	-0.47
150	-1.98	-2.65	-0.83	-0.66
180	-2.67	-3.42	-1.11	-0.86
210	-1.28	-2.45	-0.53	-0.61
240	-0.92	-1.28	-0.38	-0.32
270	0.21	0.54	0.09	0.14
300	1.65	1.89	0.69	0.47
330	2.56	3.65	1.07	0.91

对以上表中数据分别拟合函数关系, 拟合曲线

见图 3, 可得如下功角系数表达式:

$$\text{感应式: } \lambda_{\theta_3} = \frac{1.18 \cos \theta_3}{\cos \theta_1} \quad (11)$$

$$\text{电子式: } \lambda_{\theta_3} = \frac{0.9 \cos \theta_3 + 0.1}{\cos \theta_1} \quad (12)$$

由于功角系数 λ_{θ_n} 仅由谐波功率角 θ_n 决定, 不受谐波次数 n 影响。当忽略不可测的电能表功角偏移影响时, 可认为各次谐波的功角系数表达式一致, 即:

$$\text{感应式: } \lambda_{\theta_n} = \frac{1.18 \cos \theta_n}{\cos \theta_1} \quad (13)$$

$$\text{电子式: } \lambda_{\theta_n} = \frac{0.9 \cos \theta_n + 0.1}{\cos \theta_1} \quad (14)$$

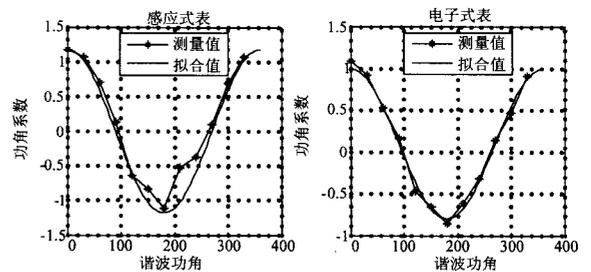


图 3 λ_{θ_3} 拟合曲线

Fig.3 Fitting curve of λ_{θ_3}

2.4 谐波响应率表达式

根据上述响应系数和功角系数, 在基波功率因数确定的前提下, 可将感应式电能表和电子式电能表的谐波响应率表达式分别确定如下:

(1) 对感应式电能表, 由系统谐波实际情况和已知参数, 仅测算 13 次及以下的奇次谐波。结合表 2 中的 α_n 数值, 谐波响应率表达式为:

$$A_H \% = \frac{\sum_{n=1}^6 \alpha_{2n+1} \gamma_{2n+1} \beta_{2n+1} \cos \theta_{2n+1}}{\cos \theta_1} \quad (15)$$

表 2 系数 α_n 数值表

Tab.2 Data table of α_n

系数	α_3	α_5	α_7	α_9	α_{11}	α_{13}
值	0.873	0.590	0.330	0.295	0.260	0.189

(2) 对电子式电能表, 因其宽频特性和系统谐波实际情况, 应准确测算各奇次谐波(一般计量 20 次以下谐波即能满足要求), 谐波响应率为:

$$A_H \% = \frac{\sum_{n=1}^9 (0.9 \cos \theta_{2n+1} + 0.1) \gamma_{2n+1} \beta_{2n+1}}{\cos \theta_1} \quad (16)$$

3 用谐波响应率修正谐波误差

由上式(15)、(16)可知, 谐波响应率的大小和正负受电能表对各次谐波的响应系数, 基波功率因数, 谐波电压、谐波电流含有率及其功率角大小影响。实际应用中, 很难准确测得流过电能表的全部谐波的相关数据, 故计算所得谐波响应率只能近似反映谐波误差大小。

原始谐波误差, 即电能表测得的全波有功电量与基波有功电量之差:

$$\Delta A = A - A_1 \quad (17)$$

按本文观点, 剔除所测得全波电量中的谐波响应量 A_H , 可有效减小谐波误差。经谐波响应率修正后的电能表谐波误差为:

$$\Delta A' = A' - A_1 = \frac{A}{1 + A_H \%} - A_1 \quad (18)$$

式中: $\Delta A'$, A' 分别表示经修正后的谐波误差和全波有功电量。

4 算例及结果分析

(1) 算例 1

现有某牵引站感应式电能表实测数据^[8], 见表 3, 各次谐波与基波方向相反, 导致谐波负误差。计算可得谐波响应率 $A_H\%$ 为 -0.0935% , 以此修正单位小时计量的全波有功电量。不考虑电能表基本误差, 修正前后电能表谐波误差对比, 数据见表 4。

表 3 某牵引站实测数据

Tab.3 Measured data of one traction station

次数	1	3	5	7	9	其它
U_n/V	100.00	0.60	1.090	0.520	0.410	未测
I_n/A	5.00	0.88	0.380	0.180	0.097	未测
$\theta_n/^\circ$	36.87	120	120	120	120	未测

表 4 修正前后谐波误差对比

Tab.4 Harmonic error comparison before and after corrected

对比量	全波电量 (kWh $\times 10^{-3}$)	基波电量 (kWh $\times 10^{-3}$)	谐波误差 (kWh $\times 10^{-3}$)
修正前	399.14	400.00	-0.86
修正后	399.51	400.00	-0.49

经修正, 谐波误差减小 43%。由于实际系统中还含有大量未测及的谐波数据, 导致修正效果有限。

(2) 算例 2

引用实验数据^[9], 基波叠加同方向的 3、5 次谐波, 具体参数见表 5, 计算可得 $A_H\%$ 为 0.497%。通过仿真电子式电能表 1h 实测有功电量数据, 计算修正电量及修正前后谐波误差量, 数据见表 6。

表 5 实验实测数据

Tab.5 Measured experiment data

次数	1	3	5
U_n/V	220	26.4	8.8
I_n/A	4.4	0.276	0.056 6
$\theta_n/^\circ$	36	66	15

表 6 修正前后谐波误差对比

Tab.6 Harmonic error comparison before and after corrected

对比量	全波电量 (kWh $\times 10^{-3}$)	基波电量 (kWh $\times 10^{-3}$)	谐波误差 (kWh $\times 10^{-3}$)
修正前	786.8	782.8	4.0
修正后	782.9	782.8	0.1

经修正, 谐波误差减小 97.5%。由于实验所测的谐波数据完整且精确度高, 误差修正效果明显。

5 结论

通过上述算例分析, 本文得出以下结论:

(1) 电能表谐波误差, 其大小等于计量全波时电能表响应的谐波电量, 可通过其谐波响应率参数加以修正, 修正效果受所得谐波数据的完整性和精确性影响。

(2) 本文的谐波响应率模型采用经验参数, 并针对电能表电量示数设计, 有很强的实用性。可以据此在电能表中加装全波电量修正环节, 修正电能表示数, 以减小甚至消除谐波误差。

参考文献

- [1] 邓志, 徐柏榆, 梅桂华. 谐波功率对感应式有功电度表计量的影响[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 141-143.
DENG Zhi, XU Bai-yu, MEI Gui-hua. Influence of Harmonic Powers on Metering Error of Induction Watthour Meter[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 141-143.
- [2] 吴彤, 艾敏, 刘以礼. 感应式电能表受谐波影响的研究[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(6): 43-45.
WU Tong, AI Min, LIU Yi-li. Study on the Influence of Harmonics Upon the Induction Watt-Hour Meter[J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech, 2000, 28(6): 43-45.
- [3] 李晓辉, 顾强, 高丽. 波形畸变对电能计量影响的分析[J]. 天津电力技术, 2007, 3: 1-4.
LI Xiao-hui, GU Qiang, GAO Li. Influence Analysis About Wave Distortion to Electric Power Metering[J]. Tianjing Electric Power Technology, 2007,3: 1-4.
- [4] 张存礼, 骆永纪. 谐波对感应式电能表计量影响与对策[J]. 电力设备, 2006, 7(1): 64-65.
ZHANG Cun-li, LUO Yong-ji. Analysis and Countermeasures of Influence of Harmonic on Induction Meter[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(1): 64-65.

(下转第 67 页 continued on page 67)

- Grid System Technique, 2nd ed [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1995.
- [2] 袁娟, 刘文颖, 董明齐, 等. 西北电网短路电流的限制措施[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 42-45.
YUAN Juan, LIU Wen-ying, DONG Ming-qi, et al. Application of Measures Limiting Short Circuit Currents in Northwest China Power Grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(10):42-45.
- [3] 阮前途. 上海电网短路电流控制的现状与对策[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 78-83.
RUAN Qian-tu. Present Situation of Short Circuit Current Control in Shanghai Power Grid and Countermeasures[J]. Power System Technology, 2005, 29(2):78-83.
- [4] Sarmiento H G, Castellanos R, Pampin G, et al. An Example in Controlling Short Circuit Levels in A Large Metropolitan Area[A]. in: IEEE PES General Meeting[C]. 2003.13-17.
- [5] 黄娟娟, 郑英芬. 特高压网架对华中电网短路电流水平的影响分析及限流措施[J]. 中国电力, 2007, 40(3): 49-52.
HUANG Juan-juan, ZHENG Ying-fen. Analysis of Effect of 1000kV UHV Grid on the Short Circuit Current of the Central China Grid and Research on Limiting Measures of Short Circuit Current[J]. Electric Power, 2007, 40(3):49-52.
- [6] Maliszewski R M, Pasternack B M. A Statistical Techniques for Projecting Future Short Circuit Level of EHV System[J]. CIGRE Symposium, 1995, (100):8.
- [7] 徐贤. 220 kV 电网短路电流预测的新方法及应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16): 103-106.
XU Xian. A Novel Method for Predicting Short-circuit Current of 220kV Sub-transmission Network and Its Application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(16):103-106.
- [8] 张进, 贺仁睦, 王鹏, 等. 送端感应电动机负荷无功特性对送出极限的影响[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 24-27.
ZHANG Jin, HE Ren-mu, WANG Peng, et al. Influence of Reactive Power Characteristic of Sending-end Induction Motor on System Sending Limitation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4):24-27.
- [9] 张啸虎, 朱忠列, 祝瑞金. 220kV 分区电网的合理配置研究[J]. 华东电力, 2006, 34(5): 36-40.
ZHANG Xiao-hu, ZHU Zhong-lie, ZHU Rui-jin. Reasonable Configuration of 220kV District Grids[J]. East China Electric Power, 2006, 34(5):36-40.
- [10] 祁万春, 奚巍民, 张谦, 等. 应用 500kV 高阻抗变压器提高 220kV 片区供电能力[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 96-98.
QI Wan-chun, XI Wei-min, ZHANG Qian, et al. Improving Power Supply Capability of 220kV District Grid Using 500kV Main Transformer with High Short Circuit Impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14):96-98.

收稿日期: 2008-12-02; 修回日期: 2009-03-20

作者简介:

杨冬(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: yangdong@mail.sdu.edu.cn

刘玉田(1964-), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制及人工智能在电力系统中的应用;

牛新生(1962-), 男, 高级工程师, 主要从事电网规划和电网计算分析方面的工作。

(上接第 61 页 continued from page 61)

- [5] 高笑, 王步云, 龙燕. 电力谐波及其对电能计量的影响[J]. 后勤工程学院学报, 2004, 2: 53-55, 73.
GAO Xiao, WANG Bu-yun, LONG Yan. Electric Harmonic and Its Influence on Electric Energy Measurement[J]. Journal of Logistics Engineering College, 2004, 2: 53-55, 73.
- [6] 褚大华. 谐波与电能计量[J]. 电测与仪表, 2007, 8: 5-9.
CHU Da-hua. Harmonic and Energy Measurement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2007, 8: 5-9.
- [7] 王思源, 彭新瑞. 配电网中一种新的谐波计量技术[J]. 电工技术, 2008, 5: 24-26, 63.
WANG Si-yuan, PENG Xin-rui. New Technology for Harmonics Measuring of Distribution Network[J]. Electrotechnical Journal, 2008, 5: 24-26, 63.
- [8] 向铁元, 张鹏, 温先卫. 感应式电表谐波计量误差软件[J]. 中国仪器仪表, 2004,(6): 3-5.
XIANG Tie-yuan, ZHANG Peng, WEN Xian-wei. The Software for Harmonic Metering Error of Induction[J]. Watt-hour Based on BP Neural Network, 2004,(6): 3-5.
- [9] 唐福顺, 禹仲明. 基于电力谐波的电能计量分析[J]. 湖南电力, 2002, 22(5): 13-15.
TANG Fu-shun, YU Zhong-ming. Energy Measurement analysis Based on Electric Harmonics[J]. Hunan Electric Power, 2002, 22(5): 13-15.

收稿日期: 2008-11-24

作者简介:

张勇军(1973-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统无功优化和电压稳定、电力系统可靠性与规划等研究; E-mail: zhangjun@scut.edu.cn

石辉(1986-), 男, 硕士生, 主要从事电力系统运行分析与控制研究。