

考虑综合效益的低压配网台区无功补偿 评估方法及其应用

欧阳森, 耿红杰, 陈欣晖

(华南理工大学电力学院, 广东广州 510640)

Reactive Compensation Evaluation Method for Low Voltage Distribution Network Area by Considering the Comprehensive Benefit and Its Application

OUYANG Sen, GENG Hongjie, CHEN Xinhui

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

摘 要: 目前低压配网台区无功补偿方案效益评估主要偏向经济效益而忽略电压质量问题, 导致无功补偿方案优劣评估只考虑初始投资问题, 本文提出了一种从电压质量及经济效益两个方面对低压配网台区无功补偿综合效益进行评估的方法。首先, 建立电压质量指标体系并且对每一指标进行描述及定义, 同时对无功补偿装置在使用过程中成本费以及节省的网损费分别进行评估, 将产生净收益作为经济效益指标; 然后, 从无功补偿点和补偿容量两个维度设计不同的无功补偿方案并且对不同方案的综合效益进行对比; 最后运用本文提出指标对实例进行分析, 结果验证本文方法能够直观评估不同无功补偿方案综合效益优劣。

关键词: 低压配网台区; 综合效益评估; 电压质量指标; 经济效益指标

Abstract: The benefit evaluation for low voltage distribution network area mainly considers economic benefit and ignores the voltage quality problems, which results in the problem that the initial investment is only considered in reactive power compensation schemes. So in this paper, a comprehensive benefit method of reactive compensation for low voltage distribution network area is presented from two aspects of voltage quality and economic benefit. Firstly, index system for voltage quality is established and each index is described and defined. At the same time, the operation cost of reactive power compensation device and the saved network-loss cost are evaluated separately, which take net income as economic benefit index. Then, different compensation schemes are designed from two aspects of the reactive power compensation capacity and compensation site, and their comprehensive

benefit are compared. In the end, examples are analyzed by using proposed indexes, and the results show the method can directly evaluate the advantages and disadvantages of comprehensive benefits for reactive compensation schemes.

Keywords: low voltage distribution network area; comprehensive benefit evaluation; voltage quality index; economic benefit index

0 引 言

目前低压配网台区(简称“台区”)负荷增长迅速, 较多的配电变压器已接近过负荷状态^[1], 尤其是新增电气负荷中大量采用电动机、压缩机等旋转设备和电力电子装置, 导致整个台区无功功率需求量大^[2-3], 而且部分台区负荷呈现“串灯笼”接线方式, 消耗的无功功率主要靠上级电网远距离输送, 造成线路末端的用户电压明显偏低。对此供电部门从无功补偿点和补偿容量两个维度提出多种无功补偿方案, 但是如何对不同方案综合效益进行评估, 却缺乏很全面的方法。

目前, 台区无功补偿效益评估主要偏向经济效益方面, 对电压质量问题或者是完全不涉及或者评估指标不全面。台区与主网及中压配网相比, 由于其线路长、负荷节点及线路分支众多且以辐射状供电方式为主, 所以其电压特性受沿线距离及其分支影响极大, 简单地采用节点电压最小值作为电压质量衡量指标是不能反映线路最大损失电压以及节点电压合格率等问题。文献 [4] 是从理论上分析了无功补偿具有减小线路损失电压及节省网损的潜力,

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50937001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2012ZM0018)

但是没有量化指标来衡量改善的大小，所以也就无法对不同无功补偿方案改善电压质量的优劣做出直观判断。文献 [5] 以电压合格裕度作为电压质量指标对无功补偿容量进行优化，文献 [6] 利用最大电压偏移量指标来衡量不同措施改善电压质量的效果，然而这些文献均是对 10kV 及以上电压等级网络的电压质量评估且采用单一指标来反映电压质量好坏情况。文献 [7-8] 把网损减小量作为无功补偿经济效益，没有考虑无功补偿成本和电压质量问题。无功补偿经济效益评估工程上还常使用损失因子法或者引入无功补偿经济当量的概念^[9-10]将成本与减小的网损量联系起来，通过投资回收周期指标说明无功补偿经济效益的优劣，上述方法没有考虑资金时间价值，同时忽略无功补偿装置自身消耗的功率及实际运行过程中维护费等等，所以这些方法只是针对短期经济效益评估，而不适用长远经济效益评估。

与 10kV 以上电网相比，台区参数众多、类型复杂，沿线电压波动性大（首末端电压偏差往往可达 30% 左右）、节点电压曲线呈现急速下降或转折特性，本文拟以当前比较关注、也是电压质量较差且最难治理的台区作为研究对象。本文首先建立电压质量指标包括节点电压合格率、节点电压最大值、节点电压峰谷值、节点电压最大偏移量指标；其次在考虑资金的时间价值条件下对无功补偿的成本及节省的网损分别进行评估，包括初始投资、运行费、维护费等等；最后改变无功补偿点和补偿容量形成不同的无功补偿方案，通过潮流等手段获取不同补偿方案下的电压质量及经济效益指标值，为实际台区无功补偿方案优选提供依据。

1 无功补偿综合效益指标

无功补偿能够产生提高电压质量和降低网损双重效益，所以本文提出的无功补偿综合效益指标主要涵盖两方面：电压质量指标和经济效益指标。

1.1 电压质量指标

台区目前面临的电压质量问题主要是节点电压合格率低、线路首端电压越上限、线路损失电压大、最小节点电压偏离额定电压幅度大，所以本文主要从以下几个方面建立电压质量指标：①能够反映台区电压合格的情况；②无功补偿过程中是否出现首端电压越上限；③反映台区线路损失电压大小；④台区最差的节点电压与额定电压之间偏差大

小。如下是本文建立的电压质量指标：

1.1.1 节点电压合格率 β

节点电压合格率是指电压合格的节点数占台区总节点数比例，提高节点电压合格率是无功补偿最主要目的，所以该指标能够最直观反映无功补偿前后台区整体电压水平。根据我国相关技术导则规定低压配网电压允许偏差值为额定电压的 $-10\% \sim +7\%$ ，如果某一负荷节点电压不在该范围内，则认为该节点电压不合格的，计算公式如下：

$$\beta = \frac{n_1}{n_2} \quad (1)$$

式中： n_2 表示台区所有节点数； n_1 表示 n_2 个节点中电压合格的节点数。

1.1.2 节点电压最大值 U_{\max}

$$U_{\max} = \{U_1, U_2, U_3 \dots U_i \dots U_{n_2}\} \quad (2)$$

式中： U_i 表示台区第 i 个节点电压值； $U_{\max} < 0.7U_N$ 表示台区所有节点电压均越下限，无功补偿完全不足； $0.7U_N \leq U_{\max} \leq 1.1U_N$ 表示节点电压最大值在合格范围内，在此范围内值越大，说明其他节点电压越下限可能性越小； $U_{\max} > 1.1U_N$ 表示最大节点电压越上限，出现过补偿的情况； U_N 表示台区额定电压。

1.1.3 节点电压峰谷值 U_{p-p}

线路损失电压是造成台区电压偏低的重要原因，线路损失电压越大，电压不合格的节点就会越多，本文采用配变低压侧电压即台区首端电压与节点中最小电压的差值作为节点电压峰谷值，该指标反映台区某一主干线路或者是分支线路的最大损失电压，计算公式如下：

$$U_{p-p} = U_{\text{配低}} - U_{\text{最小}} \quad (3)$$

式中： $U_{\text{配低}}$ 表示变比为 10/0.4 的变压器低压侧的电压值即台区首端电压； $U_{\text{最小}}$ 表示台区节点电压最小值，节点电压峰谷值越小表示线路损耗电压越小，整个台区电压质量也就越好。

1.1.4 节点电压最大偏移量 ΔU_{\max}

节点电压最大偏移量反映台区电压最差的节点与额定电压之间偏移量大小，该指标越大说明最差的节点电压偏离额定电压越大，计算公式如下：

$$\Delta U_{\max} = |U_{\text{额定}} - U_{\text{最小}}| \quad (4)$$

式中： $U_{\text{额定}}$ 表示台区额定电压，节点电压最大偏移量小说明台区中电压质量最差的节点越靠近额定电压 380V。

1.2 无功补偿经济效益指标

台区无功补偿能够节省网损,但是补偿设备初始投资也很大,而且无功补偿在使用过程中运行费、维护费、节省的网损费是较长时间连续发生的费用,所以无功补偿经济效益需要考虑资金的时间价值,文中无功补偿装置成本费的计算借鉴了文献[11]的计算模型,如下是具体评估过程:

1.2.1 无功补偿装置成本费 LCC

无功补偿装置成本包括初始成本以及运行过程中运行费、维护费、故障费等等,其中初始成本是指建设阶段的设备采购成本以及施工安装成本,设无功补偿装置的使用寿命为 T 年,则从无功补偿装置使用过程中总的投资费用为 LCC ,计算如下:

$$LCC = C_k + \sum_{i=0}^{T-1} C_0 \times PV_{\text{sum}} + \sum_{i=0}^{T-1} C_m \times PV_{\text{sum}} + \sum_{i=0}^{T-1} C_f \times PV_{\text{sum}} - C_d \times PV \quad (5)$$

$$PV_{\text{sum}} = \left(\frac{1+r}{1+R} \right)^t \quad (t = 1, 2, \dots, T-1) \quad (6)$$

$$PV = \left(\frac{1+r}{1+R} \right)^{T-1} \quad (7)$$

$$C_0 = Q_c \times \zeta \times \tau \times OC \quad (8)$$

式中: T 为无功补偿装置的使用寿命; C_k 是初始成本,包括两部分,一部分是购买无功补偿装置以及相应安装盒的费用,第二部分为施工安装成本费; C_0 是无功补偿运行成本费,主要包括电容器等无功补偿装置自身消耗电能造成的经济损失费用; Q_c 是台区某种无功补偿方案下总的无功补偿容量; ζ 表示的是无功补偿设备损耗功率占补偿容量的比例,文献[12]中指出对于电容器补偿 ζ 取 0.5%; τ 是无功补偿装置年投运小时数; OC 是电价; C_m 是维护成本; C_f 是故障成本,包括故障检修费用和故障损失费用; C_d 是废弃成本费; r 表示的通货膨胀率; R 社会贴现率。国家发改委《建设项目经济评价方法与参数(第3版)》规定将社会折现率取为 $R=8\%$,通货膨胀率可取 $r=4\%$ 。

1.2.2 无功补偿节省网损费 $W_{\text{网损}}$

台区网损包括线路以及变压器损耗,无功补偿设备在使用过程中节省的总网损费,计算如下:

$$W_{\text{网损}} = \Delta P_{\text{网损}} \times \tau \times OC \times \sum_{i=0}^{T-1} PV_{\text{sum}} \quad (9)$$

式中: $\Delta P_{\text{网损}}$ 表示无功补偿后与无功补偿前相比节省的有功功率。

1.2.3 无功补偿净收益 ΔLCF

无功补偿设备在使用过程中净收益为节省网损费与总成本费之差,计算如下:

$$\Delta LCF = W_{\text{网损}} - LCC \quad (10)$$

2 本文算法流程

不同无功补偿点和补偿容量对改善电压质量、降低网损效果不同,本文从补偿点和补偿容量两个维度设计多种无功补偿方案;然后通过潮流等手段计算不同补偿方案电压质量及经济效益指标值;最后通过指标值的直观对比反映不同无功补偿方案综合效益优劣,其具体的流程如图1所示。

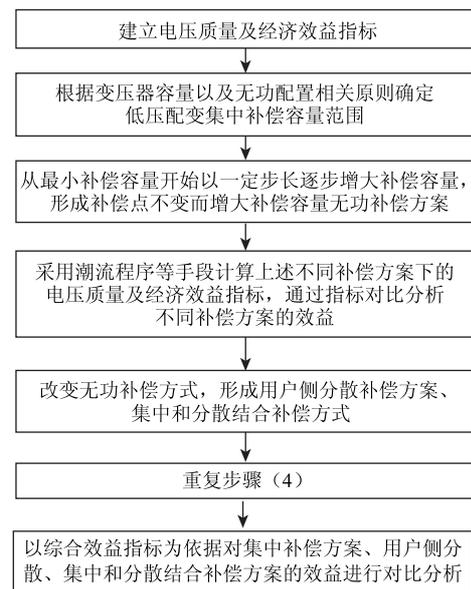


图1 本文无功补偿方案评估流程

上述流程图中提到从补偿容量及补偿点两个维度建立无功补偿方案,具体实施过程如下:

① 目前台区常用无功补偿方式是配变低压侧集中补偿,《国家电网公司电力系统无功补偿配置技术原则》中明确规定该方式下补偿容量为配变容量的 20%~40%,但是补偿容量在这个范围内并没有一个细化规定,供用电双方在选择补偿容量时往往会人为选择一个值,本文从最小补偿容量开始,以一定步长逐步增大补偿容量,形成补偿点不变而改变补偿容量的无功补偿方案。

② 用户侧分散补偿,该方式补偿点一般是电压偏低的节点或者是所带负荷较重的节点,补偿容量为该节点负荷所需的无功功率。

③ 集中和分散结合补偿方式,该补偿方式为

了减少补偿点，通常选择选出 3~4 个电压明显偏低的节点作为分散补偿点，除此以外还在配变低压侧进行集中补偿。

3 实例分析

3.1 实例模型和参数设置

本文以某供电局台区为例分析 3 种无功补偿方式下电压质量及经济效益改善效果，如图 2 是某台区结构图，该台区总共有 18 个负荷节点，台区节

点电压额定值为 380V，从结构图中可以看出该台区典型特点是负荷呈“串灯笼”接线方式，最小截面积只有 10mm²，各元件的参数如下：①配电变压器为 S11-500 型，容量为 500kVA；②各输电线路的型号、长度和截面积如图 2，导线的铜电阻率为 $\rho=0.0175\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$ ，通过计算可得到各段线路电阻及电抗；③各负荷节点的功率如表 1，其中有功功率由电量估算得到，并以功率因数 0.85 估算无功功率值。

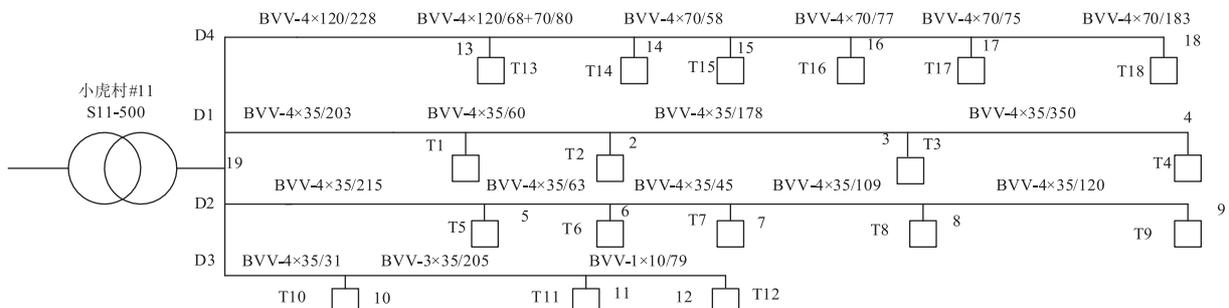


图 2 某台区结构图

表 1 负荷节点有功功率和无功功率

负荷节点	有功功率/kW	无功功率/kvar	负荷节点	有功功率/kW	无功功率/kvar
1	34.508	21.386	10	20.000	12.394
2	14.177	8.786	11	24.390	15.116
3	24.373	15.105	12	22.633	14.027
4	29.335	18.180	13	20.833	12.911
5	35.677	22.111	14	19.980	12.382
6	32.772	20.310	15	35.250	21.846
7	13.723	8.505	16	14.781	9.161
8	19.567	12.126	17	16.995	10.533
9	25.568	15.846	18	20.569	12.748

经济效益中参数如下：①无功补偿装置使用寿命为 10a，电容单价为 80 元/kvar，安装盒为 2 500 元/个，每一个补偿点的无功补偿装置安装费为 1 000 元；②前 5a 年维护费为无功补偿装置初期成本的 10%，后 5a 的年维护费为初期成本的 15%；③无功补偿装置年投运小时数为 4 800h，电费单价为 0.6 元/kWh；④每台装置年故障成本为 1 000 元，无功补偿装置的回收费为 10 元/kvar。

3.2 实例计算结果

本算例以配变高压侧节点为平衡节点，由于配变容量为 500kVA，则集中补偿容量范围为 100

~200kvar，以 20kvar 为步长逐步增大补偿容量，限于篇幅，本文只作出了部分不同集中补偿容量下 1~19 节点电压曲线图，如图 3 所示，是不同集中补偿容量 1~19 节点电压曲线图。

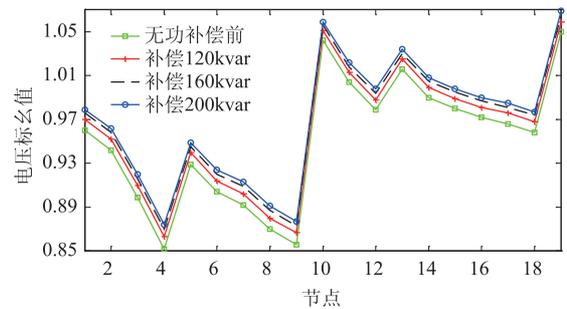


图 3 不同集中补偿容量台区节点电压分布

算例中为了对补偿容量一定，而改变补偿方式的综合效益进行比对分析，所以从集中补偿中选择出某种容量分别作为分散补偿方式及集中和分散结合补偿方式的总补偿容量。

限于篇幅本文只选择 100kvar 作为分散补偿的总容量，由潮流计算结果知 4、5、6、7、8、9 节点的电压偏低，所以选择这 6 个点作为补偿点，各个补偿点的补偿容量近似为该负荷节点所需的无功功率，由表 1 各个节点无功功率知补偿容量分别为

19kvar、23kvar、20kvar、9kvar、13kvar、16kvar；对于集中和分散结合补偿方式，补偿总容量仍然选择为100kvar，分散补偿点为电压明显偏低的4、8、9节点，补偿容量分别为19kvar、13kvar、16kvar，则配变低压侧集中补偿总容量为52kvar，如图4是不同补偿方式台区1~19节点电压曲线图。

从图3和图4中可以看出有多个节点的台区其电压分布复杂，电压曲线呈现转折特性，对每个节点电压进行分析进而得到整个台区电压质量好难以实现，所以对台区建立特征性电压质量指标，将复杂问题简单化是非常必要的。表2和表3

是本文算例集中补偿、分散补偿、集中与分散结合补偿方式下指标值分布情况。

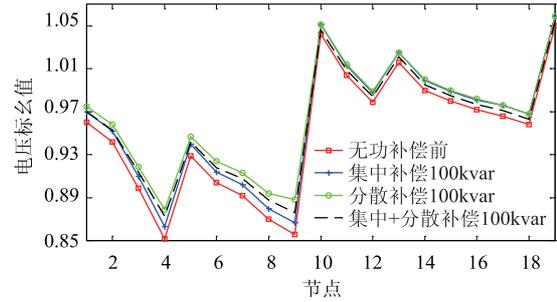


图4 不同无功补偿方式台区节点电压分布

表2 不同集中补偿容量台区电压质量及经济效益指标结果对比

方案	$\beta/\%$	U_{\max}/V	U_{p-p}/V	$\Delta U_{\max}/V$	$C_k/\text{万元}$	LCC	$\Delta P_{\text{网损}}/\text{kW}$	$\Delta LCF/\text{万元}$
补偿前	78	399.040 4	75.233 8	56.193 4	0	0	—	—
100kvar	84.2	402.567 8	74.581 5	52.013 7	1.15	4.243	2.375 1	1.562 3
120kvar	84.2	403.267 8	74.455 6	51.187 8	1.41	4.799	2.789 5	2.019
140kvar	84.2	403.988 7	74.354 2	50.365 6	1.57	5.356	3.184 0	2.426 5
160kvar	84.2	404.767 8	74.224 9	49.457 1	1.73	5.912	3.559 1	2.787 4
180kvar	84.2	405.368 9	74.101 4	48.732 5	1.89	6.470	3.914 9	3.099 0
200kvar	78	406.267 8	74.004 5	47.736 7	2.05	7.026	4.251 7	3.366 2

表3 不同补偿方式台区电压质量及经济效益指标结果对比

方案	$\beta/\%$	U_{\max}/V	U_{p-p}/V	$\Delta U_{\max}/V$	$C_k/\text{万元}$	LCC	$\Delta P_{\text{网损}}/\text{kW}$	$\Delta LCF/\text{万元}$
补偿前	78	399.040 4	75.233 8	56.193 4	0	0	—	—
集中补偿 100kvar	84.2	402.567 8	74.581 5	52.013 7	1.15	4.243	2.375 1	1.562 3
用户侧分散补偿 100kvar	89.47	402.512 7	68.304 8	45.792 1	2.9	7.318	14.65	28.490
集中+分散补偿 100kvar	84.2	402.468 4	68.315 4	45.847	2.2	6.089	12.767	25.020

3.3 计算结果分析

3.3.1 首端集中补偿综合效益分析

① 首端集中补偿不能实现全台区的有效补偿，尤其是中段和末端电压。

集中补偿补偿点只有一个，初始投资小，易于被供用电双方采用，但是这种补偿方式的无功仍然要沿线输送到各负荷节点，使得网损和线路损耗电压仍然居高难下。

② 增大首端集中补偿容量，电压质量指标改善效果不明显。

随着补偿容量增加，节点电压合格率基本没有变化，而补偿到一定容量时使离配变较近节点电压越上限且补偿容量在100~180kvar时，只考虑节点电压合格率指标，各方案的优劣是无法比较的，需要结合其他指标综合考虑。

③ 在只考虑经济效益时，补偿容量越大初始投资越大，但最终净收益也越大。

3.3.2 分散补偿综合效益分析

① 分散补偿能够很好改善台区电压质量

由表3中指标可以看出，分散补偿节点电压合格率得到明显提高，19个节点中只有2个节点电压越下限，节点电压最大值为402V左右，不存在节点电压越上限的隐患。

② 分散补偿实现了无功就地补偿，避免无功大量传输，所以网损改善效果好，最终净收益大，但是由于补偿点多、维护困难等原因导致初始投资大。

3.3.3 集中和分散结合补偿综合效益分析

① 该方案19个节点中有3个节点电压越下限，其他指标均有较大改善；

② 该方式由于存在首端集中补偿，无功仍然要沿线传输，网损改善效果一般。

3.3.4 3种方式效益比对分析

在总补偿容量相同的情况下：

① 改善电压质量和网损效果优劣排序；分散

补偿>分散和集中结合补偿>集中补偿;

② 初始投资及成本优劣排序: 集中补偿>分散和集中补偿>分散补偿;

③ 最终净收益优劣排序: 分散补偿>分散和集中结合补偿>集中补偿;

通过以上指标对比可以看出: ① 采用分散补偿综合效益最好且首端集中补偿最差; ② 集中和分散结合补偿改善电压质量、网损的效果及最终的净收益大小与分散补偿相差不大, 但是分散补偿的初始投资、运行费、维护费等过大, 所以实际应用中考虑到成本问题, 首选集中和分散结合补偿也是可行的。

4 结束语

① 本文提出从电压质量及经济效益两个方面对无功补偿方案综合效益进行评估的方法, 首先结合台区特点从3个方面着手提出4个电压指标; 其次对无功补偿装置的初始投资、网损费等分别进行评估, 将最终产生的净收益作为经济效益指标。

② 台区首端集中补偿成本小, 但是不能实现全台有效补偿; 分散补偿改善电压质量及网损效果好, 最终净收益大但由于补偿点多且维护困难, 所以初始投资、维护费等大; 集中和分散结合补偿方式汇聚了集中补偿和分散补偿的部分优点, 但是仍然存在不能很好改善台区中端及末端电压质量问题; 所以在不考虑初始投资及后续维护费等问题时对于本文所研究的台区首先推荐分散无功补偿方式, 但是如果实际应用中考虑初始投资及后续维护费大等问题, 采用集中和分散补偿相结合的方式也是可行的。

③ 从实例结果可以看出采用本文的指标很容易直观地评估无功补偿方案综合效益的优劣, 同时说明如果只考虑初始投资其评估结果过于片面, 需要结合电压质量、初始投资、最终净收益等指标才能做出合理的评估。

参 考 文 献

[1] 丁建学. 农村低压电网无功补偿方式选择与实际效

益分析 [J]. 电力学报, 2007, 22(2): 227-230.

- [2] 赵宏伟, 张晓清, 王步云, 等. 低压终端线路无功补偿技术 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(2): 46-48.
- [3] 白先红, 张勇军, 陈艳. 配电网电压改善潜力的静态评估与应用 [J]. 现代电力, 2014, 31(3): 29-33.
- [4] 戴晓亮. 无功补偿在配电网中的应用 [J]. 电网技术, 1999, 23(6): 11-14.
- [5] 李亚男, 张粒子, 杨以涵. 考虑电压约束裕度的无功优化及其内点解法 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 1-3.
- [6] 罗家健. 配电网电压偏差综合优化案例分析 [J]. 机电工程技术, 2013, 42(4): 31-36.
- [7] 许红兵. 并联电容器无功补偿的经济运行 [J]. 电力电容器, 2006, (2): 12-17.
- [8] 张勇军, 廖民传. 配电线路10/0.4 kV综合无功优化配置建模 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(3): 41-45.
- [9] 曹淑娟, 王春波. “分散无功补偿”在农网中的应用及节能分析 [J]. 河南理工大学学报, 2005, 24(5): 378-380.
- [10] 张巍. 浅谈无功补偿经济当量 [J]. 农村电气化, 2000, (3): 26-27.
- [11] 夏成军, 邱桂华, 黄冬燕, 等. 电力变压器全寿命周期成本模型及灵敏度分析 [J]. 2012, 40(1): 26-30.
- [12] 王涛. 关于无功补偿降损及经济效益分析的有效计算 [J]. 1999, 23(2): 21-22.

收稿日期: 2014-09-25

作者简介:

欧阳森(1974—), 男, 副研究员, 工学博士, 主要从事电能质量、节能技术与智能电器研究, E-mail: ouyangs@scut.edu.cn;

耿红杰(1988—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要从事电能质量分析与控制方面的研究, E-mail: 1052156466@qq.com;

陈欣晖(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事电能质量分析方面的研究, E-mail: 147752597@qq.com.

(责任编辑: 林海文)