

# 基于晶闸管的无触点线路调压装置的低电压治理

姚晓<sup>1</sup> 赵莉华<sup>2</sup> 马啟潇<sup>1</sup> 程胤璋<sup>2</sup> 李铭<sup>3</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610041;

2. 四川大学电气信息学院 四川 成都 610065; 3. 成都亿成科技有限公司 四川 成都 611731)

**摘要:**为解决农村电网中普遍存在的低电压问题,提出了采用基于晶闸管无触点线路调压装置的治理措施。晶闸管无触点线路调压器将两个晶闸管反并联处理后连接到一台串联变压器的一次侧抽头上,通过设计相对应的单片机控制系统发出相应的触发信号来控制这组晶闸管开关的通断从而调整变压器一次侧绕组接入的多少达到稳定输入电压的作用。在具体控制中,为了防止出现两组晶闸管开关器件之间形成环流,需要找到相应的措施来开通晶闸管开关。经过试验验证,晶闸管无触点线路调压器完全可以起到稳定电压的作用。

**关键词:**低电压治理;电能质量;晶闸管;无触点调压

中图分类号:TM727 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2018)02-0041-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.02.010

## Low Voltage Regulation of Non-contact Regulating Device Based on Thyristor

Yao Xiao<sup>1</sup>, Zhao Lihua<sup>2</sup>, Ma Qixiao<sup>1</sup>, Cheng Yinzhang<sup>2</sup>, Li Ming<sup>3</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China; 3. Chengdu Yicheng Technology Co., Ltd., Chengdu 611731, Sichuan, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of low voltage in the rural power grid, the control measures of voltage regulating device based on the non-contact line of thyristor are proposed. Thyristor step voltage regulator will be treated as two thyristors in inverse parallel connection to a series on the primary side of transformer tap, with the corresponding design of single chip micro-computer control system, the corresponding trigger signals are released to control the set of thyristor, thus it adjusts the transformer winding connecting in primary side to stabilize the input voltage. In the concrete control, in order to prevent the formation of circulation between thyristor switch devices, the corresponding measures need to be found to open the thyristor switch. It is proved that the thyristor step voltage regulator can be used to stabilize voltage.

**Key words:** low voltage regulation; power quality; thyristor; voltage regulation without contact

## 0 引言

新世纪以来伴随着中国对农村建设的一系列扶持政策,广大农村的用电情况发生了翻天覆地的变化,而农网所承受的供电压力也与日俱增,许多地区电网都存在低电压的问题,电网长期处于低电压运行状态会对电网以及用电设备产生严重的影响。在电网方面,低电压会使变压器的输出功率降低,运行线路损耗增加。在用户方面,低电压会导致用电设备、机床电器的电磁开关、电磁铁的吸力不足,操作

控制失效,触头烧毁,普通家用电器也会出现启动困难,缩短使用寿命,甚至烧坏的情况<sup>[1]</sup>。造成低电压问题的原因,一方面是管理的因素,农村供电部门普遍缺少管理经验,同时受地理位置的影响,许多输电线路的铺设难度极大,造成电网延伸点分布众多。另一方面是技术的因素:中国农网电压等级为35 kV、10 kV、0.4 kV,其中10 kV线路的供电负荷大、供电半径长,因此在实际运行中往往存在低电压的情况;由于上一级系统电压较低,造成10 kV母线出现电压过低的问题;某些情况下配电变压器的安装位置会偏离用电负荷的中心位置,造成低压线路分

布超出了其供电半径,这也会使电网低电压运行<sup>[2]</sup>。

为了解决这一问题,国内外专家学者进行了广泛的研究,主要提出了以下几种治理方法:文献[3-4]提出了静止型动态无功补偿装置SVG进行低电压治理的方案,通过控制其无功输出的大小,就可以调节系统的电压损耗,从而调节系统的电压水平。文献[5-7]提出了通过降低变压器的三相负荷来改善三相不平衡情况,该方法可以有效降低变压器和线路的损耗,尤其是对于传统的采用Yyn0接线方式的配电变压器降损效果更显著。一般要求变压器出口处电流不平衡度小于15%,但就目前农网格局而言,很难做到大规模的负荷调整。文献[8-9]提出了静止无功补偿器SVC进行低电压治理的方案。SVC也是目前市场上较为广泛采用的动态无功补偿装置,它具有连续调节无功功率输出、响应速度快的特点。但SVC向系统中输入的高次谐波较多,铁耗和铜耗相对来说都比较大,装置中采用的电抗器的体积也比较大,还需要进一步地改进完善。文献[10-11]提出了安装无功补偿装置的方案,既可以减少线路的损耗,也可以提高线路末端电压,一举两得。安装无功补偿设备的主要目的是平衡系统无功功率和降低损耗,无功补偿设备对线路末端电压抬升幅度取决于线路结构和负载的功率因数高低。文献[12-14]提出了在低压线路末端安装调压装置的解决方案,该方案可在不更换变压器和改造线路的情况下,提高线路末端电压,满足用户用电需求,电压提升幅度可以达到40%。但这种方法会使调压装置安装处前端电压有所降低,适用于供电半径较大、线路首末端电压差较大而末端负荷功率不是太高的配电台区。

下面所介绍的晶闸管无触点调压器具有无触点、调压范围宽、稳压精度高、动态响应速度快等特点。这种装置无需机械开关的切换,也不会产生电弧,在调节过程中不需要断电,并且成本相对较低,这些特点在电力系统经济运行、改善电网电能质量等方面都具有不可替代的优点。

### 1 无触点线路调压器工作原理

晶闸管无触点调压器主要包括串联调压变压器T1、调节变压器T2、反并联晶闸管开关器件TR、控

制器、旁路开关K、电压互感器,如图1所示。

控制器通过电压互感器从电网采集电压信号,并将其与标准电压进行比较计算,得到需要生成的附加电压 $\Delta U$ 。根据 $\Delta U$ 的取值,控制器生成相对应的信号来控制晶闸管开关器件组TR的导通与关断;反并联晶闸管器件组TR与串联变压器一次侧中心抽头相连接,根据晶闸管器件组TR的导通情况决定串联变压器二次侧感应电压的大小,也就是附加电压 $\Delta U$ 的大小,最终输出 $U_0 = U_i \pm \Delta U$ 。当检测到电网电压过低时,生成的附加电压 $\Delta U$ 为正值,称为升压调压;当电网电压过高时,生成的 $\Delta U$ 为负值,称为降压调压;这样就达到了稳定电网电压的目的。

串联变压器的副边上并联有旁路开关K,用于各种故障的快速旁路以保证线路供电连续性,也便于装置的投运、调试与检修。

由于器件串联在线路上,装置的软件设计充分考虑了短路保护、过载保护和换挡调压的快速性,缩短响应时间、换挡失电时间以及控制任何故障下的旁路时间,以便保证所有时段的供电连续性。

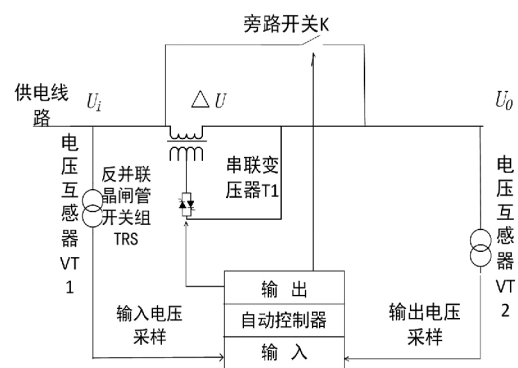


图1 晶闸管无触点线路调压器工作原理图

#### 1.1 晶闸管分接开关主电路

晶闸管反并联器件组是整个装置的关键元件,它必须在不影响变压器负载正常工作的情况下实现对变压器一次侧分接抽头的切换,来调节输出电压,即自动稳定有载调压。晶闸管是一种半控型的电力电子器件,它本身没有自关断的能力,可是如果将其运用在交流电系统中,可以借助其过零关断的能力实现晶闸管的导通关断,所以将两只晶闸管反向并联作为交流开关使用。在工作中,反并联的两只晶闸管各自只会通过完整正弦波中的一个半波,实现了开关的无触点化,且器件反应时间可以达到微秒级。正因为这些优点,在所提方案中将其作为有载

调压器的执行元件。具体设计时,把反并联晶闸管组连接到变压器一次侧的每一段绕组与中性点之间,从而形成了调压器执行部分的主电路,如图2所示。

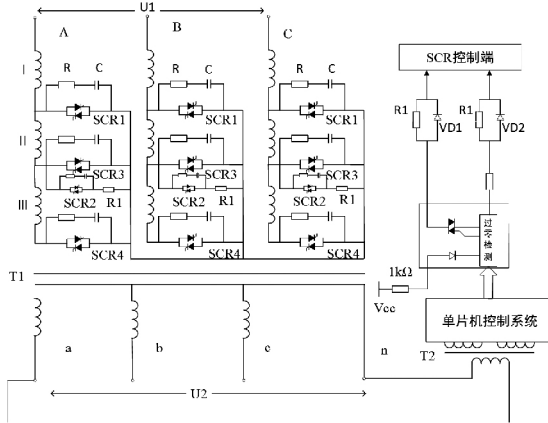


图2 反并联晶闸管连接方式

由图2可知,该方案主电路部分包括安装在变压器T1一次侧的6组反并联晶闸管器件组SCR1、SCR3、SCR4以及并联在晶闸管器件组两侧的RC缓冲电路、限流分支电路SCR2与R1,还有连接在变压器二次侧的电压检测变压器T2以及单片机控制系统。

在变压器的一次绕组处,从三相绕组中各设置3组接头,标记为I、II、III。它们与反并联晶闸管开关组SCR相连后连到变压器的中性点。单片机控制系统通过隔离变压器来监测变压器二次侧的电压,然后根据采集到的电压信号发出对应的指令信号来触发电路控制晶闸管器件组的开通和关断。除此之外,主电路部分还增加了限流分支SCR2和R1,其目的就是限制环流的大小,从而保证晶闸管器件组在切换工作过程中的供电可靠性以及安全性。

反并联的晶闸管器件组两端装设有RC缓冲电路,其目的是减小晶闸管器件长期处在快速开断时器件两端产生的高电压,也就是关断浪涌电压。

装置开始工作后,变压器一次侧的晶闸管开关工作在II档位,此时SCR3器件组导通,其他SCR器件组关断,单片机控制系统通过监测变压器检测二次侧的电压,如果电压是在(95%~105%) $U_N$ 内波动时,晶闸管器件组的工作状态将保持在II档位;当检测到二次侧电压低于95% $U_N$ 时,分接开关会调整到I档位;当二次侧电压高于105% $U_N$ 时,晶闸管分接开关就调整到III档位。

## 1.2 反并联晶闸管器件组控制策略

变压器调压分接头在调高输出电压的时候会有环流产生,但要调低输出电压时不会出现环流。

反并联晶闸管器件组在工作中,单片机控制系统只能通过触发信号控制器件的导通,如果要关断晶闸管必须选在晶闸管通过的电流过零的时候,所以有必要研究具体操作时的控制方式。

图3为变压器正常运行时的等效电路图。

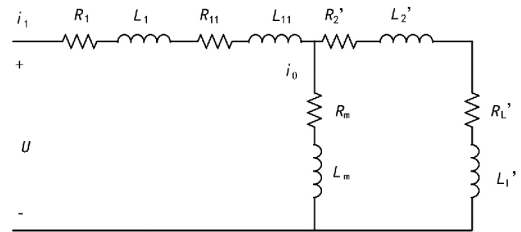


图3 变压器稳态运行的等效电路

图3中 $L_1$ 和 $R_1$ 为主绕组的电感和电阻值, $L_{11}$ 和 $R_{11}$ 分别为分接开关 $k_1$ 和 $k_2$ 之间调压绕组的电感和电阻值。 $R_m$ 、 $L_m$ 分别为励磁电阻、电抗, $R_2'$ 、 $L_2'$ 分别为归算后的二次侧绕组电阻、电抗。 $R_L'$ 、 $L_L'$ 分别为归算后的负载电阻、电抗。在工作时 $I_1 \gg I_0$ ,可略去励磁阻抗的存在,变压器简化等效电路如图4所示。

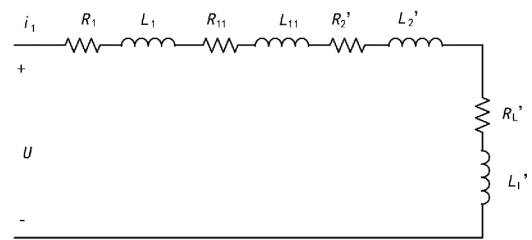


图4 变压器稳态运行的简化等效电路

假设原边电压 $u = U_m \sin(\omega t + \theta)$ ,原边电流为 $i_1$ ,由图4可以得到 $i_1$ 在稳态运行时为

$$i_1 = \frac{U}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}} \sin(\omega t + \theta - \alpha) = I_m \sin(\omega t + \theta - \alpha) \quad (1)$$

式中 $I_m = \frac{U}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}}$ , $\alpha = \arctan(\omega L/R)$ 。

由于晶闸管开关电流过零关断的特点,如果控制系统同时发出晶闸管关断和导通的信号时,会出现将要开通的开关导通而需要断开的开关还未能关断的情况,在两个开关器件所构成的闭合回路中就会出现环流 $\Delta i$ , $\Delta U$ 为两晶闸管开关间的电压, $K_1$ 、 $K_2$ 为分接头,等效电路如图5。

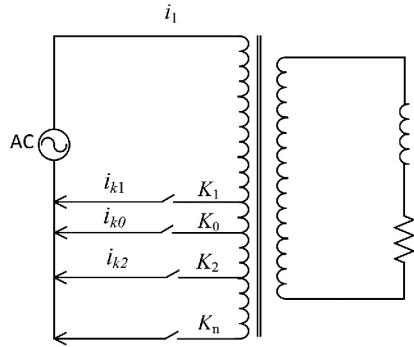


图5 晶闸管器件组等效电路

可以计算得到:

$$\Delta i = \Delta I \sin(\omega t + \theta - \delta) + Ae^{-\frac{R_{11}}{L_{11}}t} \quad (2)$$

式中  $\Delta I = \frac{\Delta U}{\sqrt{(\omega L_{11})^2 + R_{11}^2}}$   $\alpha = \arctan(\omega L_{11}/R_{11})$ 。

由于  $L_{11}$ 、 $R_{11}$  很小,即使很小的  $\Delta U$  都将产生较大的  $\Delta I$ ,使得  $\Delta I \gg I_m$ 。因为  $\Delta i$  自身就是冲击电流,且  $\Delta I \gg I_m$ ,那么即使不考虑衰减系数  $A$  的大小,也可以得到  $\Delta i \gg i_1$ ,这就会严重危害装置的安全运行,导致变压器无法正常工作。为了避免上述情况的发生,可采用在电流  $i_1$  过零时导通晶闸管有载分接开关。该方法可以确保将要导通的晶闸管器件组  $K_2$  接到控制信号时,晶闸管器件组  $K_1$  已经完全彻底断开连接,电路中不会出现冲击电流  $\Delta i$ 。

## 2 晶闸管调压器主要技术指标

图6和表7分别为基于晶闸管的无触点线路调压装置的外形及局部尺寸图和对应的装置外形尺寸表。

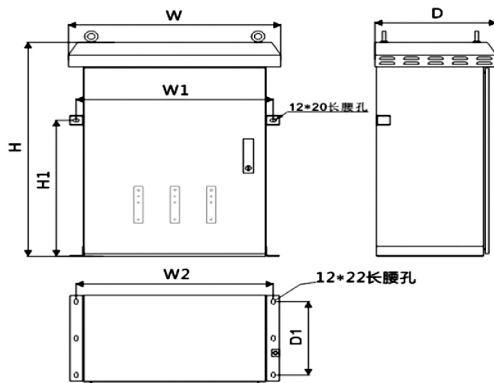


图6 基于晶闸管的无触点线路调压装置结构

图7为基于晶闸管的无触点线路调压装置的使用接线图,其中L、L3、N接口分别为火线输入、火线输出和零线接口,分别接电源侧进线L、N和用户侧出线L3、N。

表1 晶闸管无触点线路调压装置技术参数

项目	技术性能指标
额定工作电压/V	380/220
额定工作频率/Hz	50
输入电压范围/(p.u.)	0.4~1.2
输入调压范围/(p.u.)	0.7~1.2(可按用户要求设计)
额定容量/kVA	单相 10、20、30 三相 30、60、90
调压响应时间/ms	<50
调压切换时间/ms	<20

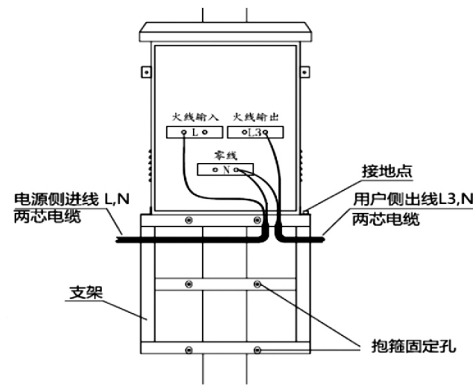


图7 装置使用接线图

## 3 实验及挂网运行

### 3.1 调压性能实验

针对调压器的调压性能进行测试。按图8所示,为了显示电压变化,将两台电压表分别接到调压器输入端、输出端,并在输出端连接一台示波器以检测电压波形。

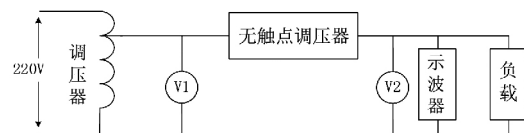


图8 测试接线图

实验时逐渐升压到最大值后再逐渐降压,同时记录调压器输入端的电压以及输出电压。将输入输出电压进行对比,结果见图9、图10。

根据试验结果可知:当输入端电压发生150V到250V之间的波动时,该型调压器具备良好的调压性能,可以将输出电压始终稳定在220V左右。根据实际电网情况,电压下降不会低于150V,所以当输入端电压不稳定时,调压器能够很好地调节输

出电压,使得输出电压保持在一个稳定的水平,供用户正常使用。

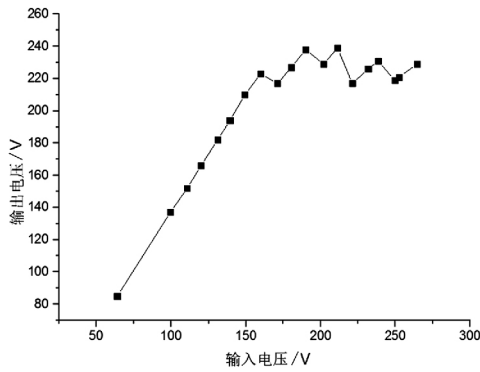


图9 升压实验数据

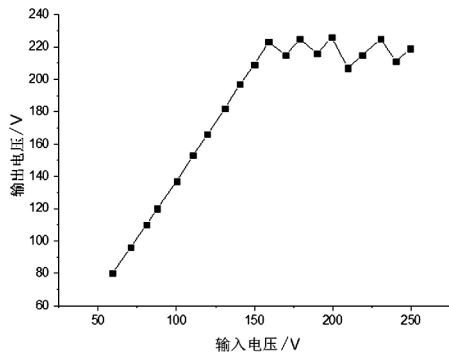


图10 降压实验数据

### 3.2 挂网运行实验

为了更好地检验在实际工作条件下的调压器工作情况,选取了某县郊区的低电压台区作为线路调压装置的挂网试验地点。该台区配电变压器容量为315 kVA,供电半径长400 m左右,支线户数为5户。装置的安装位置选择在该台区某支线线路中的C相末端。根据当地电工提供的信息,所选位置用户长期电压在190 V左右,在用电高峰时期,甚至低至160 V左右,导致居民不能正常使用家用电器,严重影响了正常生活用电。安装效果如图11所示。

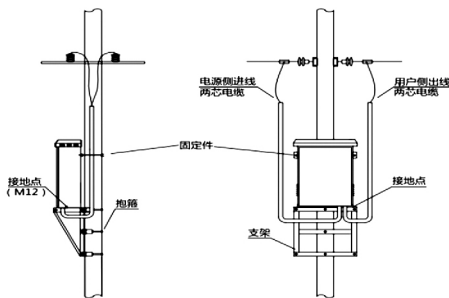


图11 晶闸管无触点线路调压装置安装效果示意

设备投入运行后,通过电能质量分析仪记录的支路农户数据情况如图12所示。

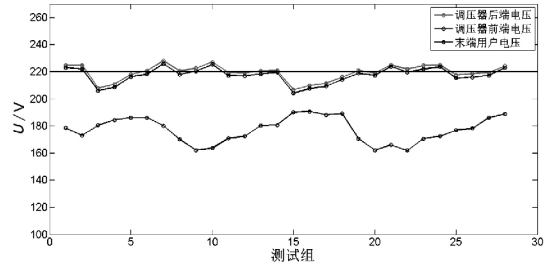


图12 调压装置挂网运行后线路测试数据

由图12分析可知,经过调压器的处理后,低电压问题得到显著改善,线路末端电压始终处于一个稳定的水平。这说明无触点线路调压器解决了该县低电压台区末端电压偏低问题,相比增设变压器等解决方式大大节省了成本。这种调压器配置灵活,能做到快速安装解决低电压问题,无论投入的成本还是人力均较低,简单方便,可以大力推广使用。

## 4 结论

针对电网中的低电压问题,提出了采用基于晶闸管无触点线路调压装置的治理措施,并通过实验验证了该方案对处理低电压问题的有效性,并得到以下结论:

1) 晶闸管无触点线路调压器能够对电网电压的波动进行快速频繁的调节,使线路末端电压的合格率得到满足。而且相对于有触点调压器以及其他调压设备有很多优点,如快速性和频繁性。在实验中,可以看到晶闸管无触点线路调压器在输入端不断地进行升降压操作时,均可以将输出电压保持在一个比较稳定的水平,从而很好地解决了电网中的低电压问题。这对整个电力系统而言都具有相当重要的意义。

2) 基于晶闸管的无触点调压器在控制策略方面需要格外注意,为了防止晶闸管器件组之间形成强大的环流损坏晶闸管以及线路,可采用在电流  $i_1$  过零时导通晶闸管有载分接开关消除环流的影响。

### 参考文献

[1] 宋秀芳. 基于快速开关型串联补偿的农网低电压治理研究[J]. 电气技术 2017(1): 92-94.  
 [2] 崔晓飞, 许中, 朱明星, 等. 低电压治理装置的适用性分析[J]. 电气应用 2016(23): 61-65.  
 [3] 高生军, 张浩, 姬强. 10kV 串联补偿装置在低电压治理中的应用[J]. 自动化应用 2016(5): 96-97.

(下转第94页)

[4] 姚伟锋,赵俊华,文福拴,等. 基于双层优化的电动汽车充放电调度策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(11):30-37.

[5] Dominik Pelzer, David Ciechanowicz, H Aydt, et al. A Price-responsive Dispatching Strategy for Vehicle-to-Grid: An Economic Evaluation Applied to the Case of Singapore[J]. Journal of Power Sources, 2014, 256(3): 345-353.

[6] 占恺峤,宋永华,胡泽春,等. 以降损为目标的电动汽车有序充电优化[J]. 中国电机工程学报,2012,32(31):11-18.

[7] 陈加盛,张建华,林建业,等. 以降低电网损耗为目标的电动汽车充电策略[J]. 电力系统及其自动化学报,2012,24(3):139-144.

[8] Sortomme E, Hindi M M, Macpherson S D J, et al. Coordinated Charging of Plug-in Hybrid Electric Vehicles to Minimize Distribution System Losses[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 198-205.

[9] He Y, Venkatesh B, Guan L. Optimal Scheduling for Charging and Discharging of Electric Vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1095-1105.

[10] Sekyung H, Soohee H, Sezaki K. Development of an Optimal Vehicle-to-Grid Aggregator for Frequency Regulation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 65-72.

[11] 陆凌蓉,文福拴,薛禹胜,等. 电动汽车提供辅助服务的经济性分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(14):43-49.

[12] Corey D. White, K. Max Zhang. Using Vehicle-to-Grid Technology for Frequency Regulation and Peak-load Reduction[J]. Journal of Power Sources, 2010, 196(8): 3972-3980.

[13] Sarre G, Blanchard P, Broussely M. Aging of Lithium-ion Batteries[J]. Journal of Power Sources, 2004, 127(127): 65-71.

[14] 比亚迪汽车官网. 比亚迪 e6 价格与配置[R/OL]. 2011-10-26. <http://www.bydauto.com.cn/car-param-e6.html>.

[15] 荣威汽车官网. 荣威 E50 价格与配置[R/OL]. 2012-11-05. <http://www.roewe.com.cn/rowee50/>.

[16] 百度百科. 日产 LEAF 参数配置[R/OL]. 2013-09-07. <http://baike.baidu.com/view/2706376.htm>.

[17] 上海中科电动汽车有限公司官网. 力帆 620 纯电动车[R/OL]. 2013-06-24. <http://www.zklf-ev.com/ShowProducts.asp>.

作者简介:

万寿雄(1991) 助理工程师,研究方向为配电网的经济运行和控制。

(收稿日期:2017-11-20)

(上接第 45 页)

[4] 金超,陆争荣,陈志华,等. 配网低电压治理探讨[J]. 科技与企业,2016(9):236-237.

[5] 曹伟. 利用无功补偿解决配电网低电压问题的对策研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.

[6] 吴克胜,周瑜,盖大忠,等. 青海配电网“低电压”治理探讨[J]. 青海电力,2015,34(4):4-7.

[7] 黄桂兰,林韩,蔡金锭. 农村配电网低电压治理措施研究[J]. 电气技术,2015(11):64-67.

[8] 吕志来,沈春雷,徐杰彦,等. 节能模式下的低电压治理方案比选研究[J]. 供用电,2015(11):43-47.

[9] 杨伟奇. 低电压综合治理系统研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2015.

[10] 张成志. 配电网低电压治理方法探讨[J]. 科技资讯,2015(8):111.

[11] 李岩. 基于项目成本控制的农村低电压综合治理模式研究[D]. 福州:福州大学,2014.

[12] 韩英. 浅谈“低电压”治理的多种技术措施[J]. 中国高新技术企业,2012(4):142-143.

[13] 潘少华. 基于农村低电压现象的综合治理研究[J]. 中国电业(技术版),2011(11):63-65.

[14] Ming Tsung Tsai. Design of a Compact Series-connected AC Voltage Regulator with an Improved Control Algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(4): 933-936.

[15] Faiz J, Siahkolah B. New Solid-state on Load Tap-changers Topology for Distribution Transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 136-141.

作者简介:

姚晓(1974) 高级工程师,从事带电检测及配电网治理相关工作。

(收稿日期:2017-12-07)