

配电网新型电压无功统一调节装置研究

现有低压配电网由于供电半径长、线路损耗大等原因，造成居民客户的电压质量不断恶化。提出一种适合在配电网中推广的新型电压无功调节装置拓扑方案和基于改进九区图的协调控制策略。仿真和试验结果验证了新型电压无功调节装置工程方案的正确性。

马 明 徐柏榆/广东电网电力科学研究院
韦统振 霍群海/中国科学院电工研究所



马 明/工程师

居民端电压合格率是配电网电压质量管理的重要指标，电压过高或过低会严重影响终端客户正常的生产生活秩序及用电设备的寿命和安全^[1-2]。因此，低压配电网是供电企业收到投诉数最多、直接影响客户满意度的环节，特别是装备水平低、投资能力差的县级供电企业，主要问题为低压供电半径长、功率因数低等。通过电网基建项目改善配电网架构是解决电压问题的根本，但投资较大、实施周期长，不能及时缓解低压配电网压力，部分情况下经济技术性差。现有电压补偿装置会增加线损率^[3-7]，无功补偿装置^[8-11]改善电压效果一般，简单组合使用^[12-14]则会存在电压过补、系统不能稳定运行的问题，甚至造成停电、降低供电可靠性。因此，在现有配电网改善电压质量技术的基础上，研发经济性好、可靠性高的低成本新型电压无功调节装置具有重要意义。

本文根据农村低压配电网的电压问题，分析了电压无功调节装置技术指标需求。在充分调研国内外电压和无功调节设备、深入研究各类设备的作用机理

的基础上^[15-17]，结合农村电网实际，提出了适用于农村电网的电压无功统一调节装置的新型拓扑和协调控制方法。通过Matlab/Simulink软件搭建了系统仿真模型，仿真结果验证了方案的可行性。研制了试验样机，试验结果验证了新型电压无功统一调节装置的功能和性能指标。工程样机在某配电台区挂网运行，效果显著。

新型电压无功调节装置拓扑方案

为实现电压调节和无功补偿的功能，本文提出一种新型电压无功调节装置的拓扑结构（单相）如图1所示。

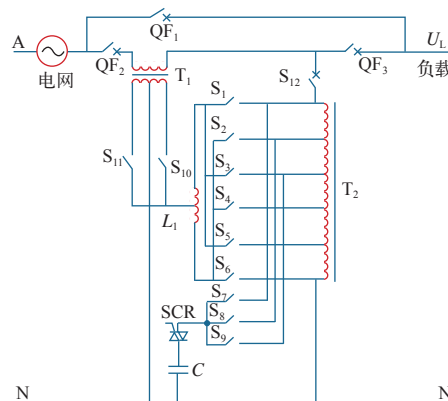


图1 新型电压无功调节装置拓扑结构（单相）示意图

1. 调压部分

调压部分由自耦变压器 T_2 、串联补偿变压器 T_1 和开关矩阵 $S_1 \sim S_6$ 组成。 T_2 平均分为5段， T_1 中心抽头接零线，通过 S_{10} 和 S_{11} 控制，实现正向和反向的电压调节。

2. 调压原理

图2为电压调节部分的原理图。根据

关键词/Keywords

电压补偿 ·
无功补偿 ·
新拓扑 ·
仿真和试验验证 ·

国家自然科学基金项目（51107134，51307158）。

基尔霍夫电压定律, 输出端和输入端的电压满足以下等式

$$\begin{aligned} U_{ao} &= U_{ai} + U_{Ba} \\ U_{Ba} &= n_1 U_{TBa} = n_1 n_2 U_{ao} \end{aligned} \quad (1)$$

以上两式联立, 可得

$$U_{ao} = \frac{U_{ai}}{1 - n_1 n_2} \quad (2)$$

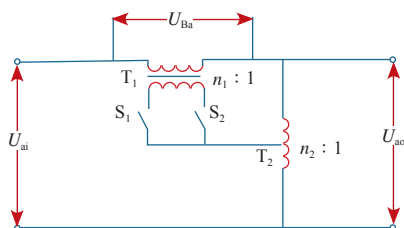


图2 电压调节原理图

通过控制 S_1 、 S_2 的闭合或断开, 可控制 T_1 补偿量的正负: 当 S_1 闭合、 S_2 断开时, T_2 补偿量为正, $U_{ao} > U_{ai}$; 当 S_2 闭合、 S_1 断开时, T_2 补偿量为负, $U_{ao} < U_{ai}$ 。通过调节 T_2 的分接头, 可控制补偿量的大小, 从而达到稳定输出电压 U_{ao} 的目的。

协调控制策略

涉及电压和无功综合调节的场合通常采用九区图控制策略。传统的九区图控制方式主要是基于有载调压装置抽头以及投切电容器开关不能频繁动作的物理条件, 因此所采用的控制策略必须尽可能地减少其动作次数从而延长装置寿命, 维持系统可靠性。目前有较多文献对该电压无功控制方式进行优化与改进, 但由于始终存在变压器与电容器日允许动作次数的约束条件, 从而无法对该协调控制进行更深层次的优化, 协调控制的效果有限。

本方案中电压无功调节装置安装在配电线路的中间或末端, 由于采用基于开关矩阵分级调压、调无功的解决方案, 执行元件成熟可靠, 不存在动作次数限制, 因此控制效果更佳。基于此, 本文对九区图控制侧率进行了改进。

1) 电压调节部分取消了电压调节动作次数的约束, 也就是说电压无功调节装置根据设备前端网侧电压有效值在任意时刻都可以实时快速

地进行电压调节, 此时只需和无功补偿部分协调即可。

2) 对电压调节设置滞环, 图3中, 电压调节上限值区别于传统九区图 U_H , 而是 $U_H - \Delta U$, 当系统处于3、4或5区时, 控制系统把电压调节执行至 $U_H - \Delta U$ 以下正常电压范围内。在应用改进的九区图控制策略时, 首先需要确定补偿电压的幅值, 进而确定投切相应的档位, 不但检测和动作时间更加快速, 而且通过控制策略的改进能够有效避免振荡情况出现。

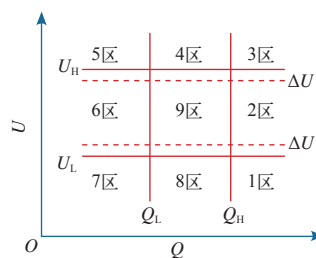


图3 改进九区图控制策略

仿真分析

根据上文中提出的拓扑结构, 在Matlab/Simulink平台下进行仿真。电压调节和无功补偿采用协调控制策略, 负载采用电感与电阻值配合随机切换来模拟随机变化的用户负载。线路电阻和电感模拟台区变压器以及配电网导线电抗, 其参数如下表所示。设备在0.1 s正常启动, 在0.2 s投入第1档负载, 0.3 s投入第2档负载, 每档负载持续时间0.1 s, 依次类推, 0.8 s投入第7档负载, 0.9 s时结束仿真。仿真结果验证此种电压无功调节器的补偿效果。

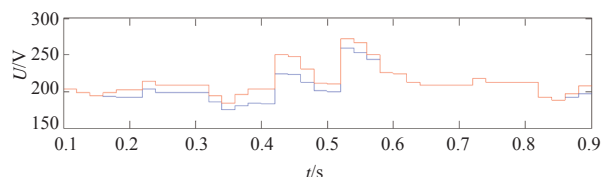
表 随机负载波动仿真数据

项目	电阻/ Ω	电感/mH
第1档电阻电感组合	0.6	0.001
第2档电阻电感组合	0.7	0.001
第3档电阻电感组合	0.3	0.001 5
第4档电阻电感组合	0.35	0.002
第5档电阻电感组合	1	0.002 5
第6档电阻电感组合	1.2	0.003
第7档电阻电感组合	0.5	0.001
线路及变压器阻抗	0.05	0.000 5

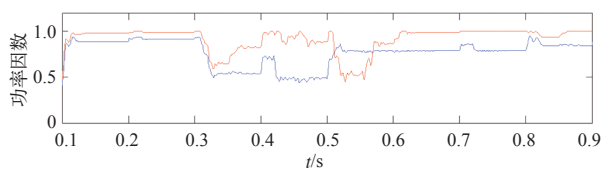
仿真结果如图4所示。图4a为补偿前后节点

电压有效值波动曲线,蓝色为补偿设备之前电网侧电压波形,红色为补偿装置之后负载侧电压波形,由图可见经过调整大部分时刻电压被控制在允许偏差($\pm 10\%$)以内,偶有超调情况发生,通过电压无功协同动作,电压有效值逐渐回到电压合格范围内。

图4b为补偿前后节点功率因数波动曲线,蓝色为负载侧功率因数波形,红色为补偿装置前端电网侧功率因数波形,从图中可看出,调整后系统的功率因数有了明显的提高,在0.5~0.6 s部分存在超调现象,这是因为负载波动的随机性导致的,系统经过几个周波的检测运算反应之后,及时调整在0.6 s又回到了近似于1的位置。



(a) 补偿前后节点电压有效值波动曲线



(b) 补偿前后功率因数波动曲线

图4 负载随机波动时仿真结果

综上所述,本拓扑结构能够对不同时期的负载做出相应的补偿,使电网电压和功率因数达标,并且响应迅速,达到本文的设计初衷和补偿要求。

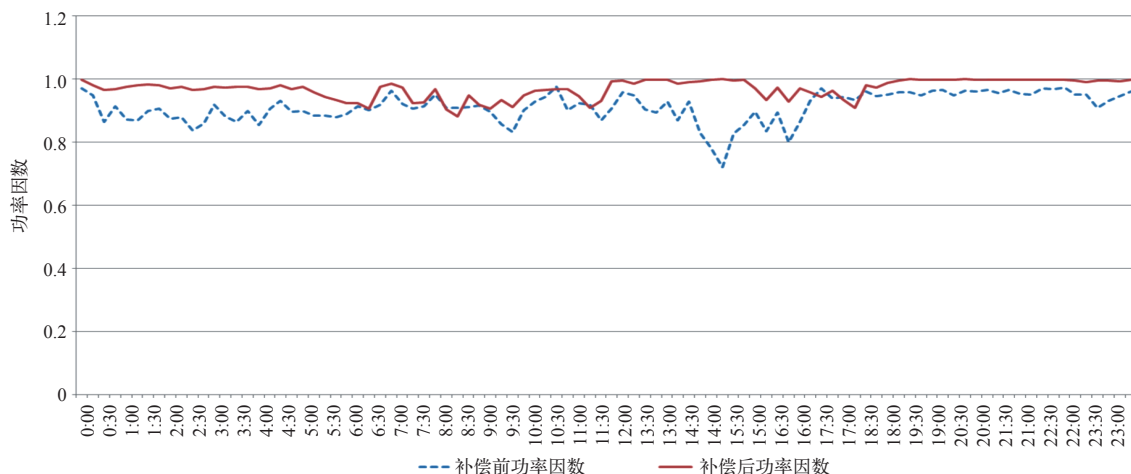


图6 补偿前后功率因数

运行试验

为验证新型电压无功调节装置的设计方案和控制策略的可行性,本文研制了75 kV·A/15 kvar试验样机。目前,样机已在广东省博罗市某配电台区试运行。

挂网地区多丘陵,农户居住较为分散,供电半径过长,导致配电台区末端用户电压质量合格率较低,装置放置于供电台区的中间,主要解决供电台区末端用户电能质量问题。运行数据如图5和图6所示。图5为电压无功统一调节装置补偿工作前后的电压波形,红色虚线为装置前端(电网侧)电压波形,蓝色实线为装置后侧(负载侧)电压波形,装置投运时段为非用电负载高峰期,用户侧电压普遍偏高,通过装置调节作用(降压),使负载侧电压维持在220 V左右理想电压。图6装置前后的功率因数,蓝色虚线为装置后侧(负载侧)功率因数波形,红色实线为装置前端(电网侧)功率因数波形,图6可以看出通过装置的无功补偿作用,电网功率因数提高比较明显。

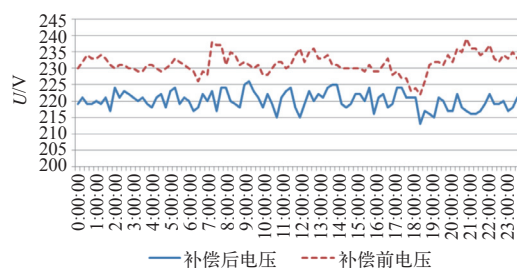


图5 补偿前后电压

结束语

论文提出电压无功补偿的新拓扑和新的协调控制方案,实现了无功和电压的统一协调补偿,满足了对农村电网低成本的电压和无功补偿要求。本装置中,电压和无功补偿共用一个并联变压器,减少了分档电容使用数量,采用通用的主流电子元件,有效降低了设备成本,便于检修和维护。通过对典型负载的模拟仿真,本方案能够对电压无功做出及时补偿,并且各项参数均满足设计之初的技术指标要求,挂网运行试验结果进一步验证了该新型装置的可行性。

本文研制的新型电压无功调节装置实现了电网电压与无功的统一调节功能,其主要创新点与优势如下。

1) 无功补偿部分在实现同样的多无功调节档位时,每相仅需1组电容,减少电容这种易损元件的使用,从而减少成本,增加系统可靠性。

2) 实现了单个装置多项功能,其电压调节功能与无功补偿功能可相互配合,协调控制,能更灵活改善配电网电能质量。

3) 本装置的开关矩阵部分的拓扑结构以及 T_2 抽头数量可以灵活配置,能够使得该装置适用于各种调节准确度需求不同的场合。

4) 在实现多项电能质量调节功能的同时,电路结构简单,所选元件均为目前应用广泛的元件,整个装置可靠性高,具有良好的实用性。

5) 装置中电压调节和无功补偿协调运行,不会出现电压过补的情况,也不会出现电压调节和无功补偿相互干扰的问题,对负载侧补偿效果要优于单独配置电压调节器和无功补偿装置。同时装置量产之后,由于设备集成度更高,总成本也低于单独配置电压调节器和无功补偿装置方案。能有效解决农村电网的电压质量问题,具有重要的经济价值和实用意义。

参考文献

[1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 124.

- [2] 杨洪耕, 肖先勇, 刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展 (三) ——电力系统的电压凹陷 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23 (12): 1-4.
- [3] 李海林, 刘小虎. 一种无触点补偿式交流稳压器的设计 [J]. 船电技术, 2010, 30 (4): 30-34.
- [4] 李建文, 张秉新. 改进型无触点补偿式交流稳压器 [J]. 电工技术, 2009 (8): 73-75.
- [5] 陈义发, 傅志中. 无触点补偿式交流稳压器 [J]. 微计算机信息, 2010 (28): 132-133.
- [6] 康秀强. 大功率智能交流稳压电源的设计 [J]. 机电工程, 2010, 27 (5): 65-67.
- [7] 李颖峰. 自动调压器在10kV线路中的应用 [J]. 广东电力, 2013, 26 (3): 62-64.
- [8] 智慧, 李群湛, 周福林. 新型动态无功补偿装置在牵引变电所应用 [J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (11): 71-74, 78.
- [9] 胡海燕, 武晓朦, 刘健. 基于遗传算法的配电网低压侧无功补偿动态优化规划 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25 (3): 25-29.
- [10] 钟庆, 张尧, 芮冬阳. 配电网自动无功补偿装置研制 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (2): 71-74.
- [11] 龚锦霞, 卢婧婧, 解大, 等. 一种新型动态无功补偿器的控制算法 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (5): 89-93.
- [12] 朱登军, 黄留欣, 黄冰, 等. 新型调压式电压无功自动调节装置 [J]. 电力电容器, 2007, 28 (3): 49-51.
- [13] 高丽, 罗宁. 电压无功自动调节装置的研制及应用 [J]. 煤矿机械, 2007, 28 (9): 146-147.
- [14] 李砾. 电压无功自动调节装置系统设计 [J]. 云南电力技术, 2010, 39 (5): 95-96.
- [15] 弋东方, 张曦, 弋戈. 一种提高农村用电供电质量的灵活解决方案 [J]. 供用电, 2011, 28 (3): 31-32.
- [16] 伍建伟. 浅析解决低压线路末端电压偏低问题的措施 [J]. 机电信息, 2012 (33): 27-28.
- [17] 赵飞, 徐跃进, 王宁. 农村电网经济供电半径和经济功率因数的研究 [J]. 电力科学与工程, 2009, 25 (12): 80-11.

(收稿日期: 2014-05-07) **EA**