

低压配用电系统两级无功补偿控制研究

罗书克, 张元敏

(许昌学院电气信息工程学院, 河南 许昌 461000)

摘要: 为了提高低压配用电系统中的功率因数、降低线损、稳定用户端电压, 提出了一种多 DSTATCOM 快速动态静止型无功补偿与 TSC 无功补偿相结合, DSTATCOM 采用固定电容容量调节其两端电压频率的方法实现无功补偿的调节。采用该方法能够实现快速无级的动态补偿, TSC 实现有级无功补偿, 把二者结合在一起实现了大容量无功补偿的无级调节, 并分析了系统的控制原理及控制策略。两级无功补偿系统具有体积小、成本低、动态响应快等特点。通过实验验证了该方法的可靠性和实用性。

关键词: 低压配用电; 两级无功补偿; 无级调节; 体积小; 低成本

Study of two-stage VAR compensation in low voltage distribution system

LUO Shu-ke, ZHANG Yuan-min

(College of Electrical & Information Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, China)

Abstract: In order to improve the power factor, reduce line loss, stabilize user terminal voltage in low voltage power distribution system, this paper proposes a new method to realize VAR adjustment, in which a fast dynamic multi DSTATCOM static VAR compensation and TSC VAR compensation are combined, and DSTATCOM adjusts VAR by changing voltage and frequency between the fixed capacitor capacity. The method can realize stepless speed dynamic compensation, TSC can realize step VAR compensation, and the combination of the two achieves the stepless adjustment of high-capacity VAR compensation. The control principle and control strategy of the system are analyzed. Two-stage VAR compensation system has the characteristics of small volume, low cost, fast dynamic response, etc. Experiments show that the method is reliable and practical.

Key words: low voltage distribution; two-stage VAR compensation; stepless adjustment; small volume; low cost

中图分类号: TM714.3 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)16-0103-05

0 引言

随着城镇化改造的推进, 人民生活水平的提高, 大量住宅小区在用电高峰期出现用户端电压偏低, 部分家用电器不能正常启动, 甚至出现过负荷跳闸断电现象。究其原因, 主要是用电负荷过大。但经过实际测试, 除了负荷过大外, 用户端的功率因数也较低, 功率因数普遍在 0.6~0.7 之间, 这也是造成用户端电压偏低, 负荷过大的原因之一。本文针对这种现象, 分析了出现这种情况的原因, 对提高用户端电压及系统功率因数作了分析, 提出一种混合型两级无功补偿系统 (Two-Stage Var Compensator, TSVC), 采用两级电能协调治理无功

补偿系统可以减小系统中无功电流的流动, 在相同的用电负荷条件下可以降低系统中的合相等效负荷。

如果配电网采用现有的静止无功补偿器 (Distribution Static var Compensator, DSTATCOM) 虽然能够进行动态连续的无功补偿, 但是在采用大容量 DSTATCOM 时, 由于电力电子器件制造工艺和工程造价的限制, 往往在设计和工程实现上存在困难^[1]。晶闸管投切电容器 (Thyristor Switched Capacitor, TSC) 也能够满足工程容量的要求, 但其不能进行连续无级的无功补偿, 并且装置的响应速度也不快, 很难满足现代电网对无功补偿技术提出的新要求。因此, 必须研究低成本无功动态补偿新型拓扑结构, 为配电网低成本节能提供装备支撑。

1 问题分析

为了便于分析问题, 假设一配用电系统只供给

某一住宅小区，其住宅小区系统供电电路图如图 1 所示。

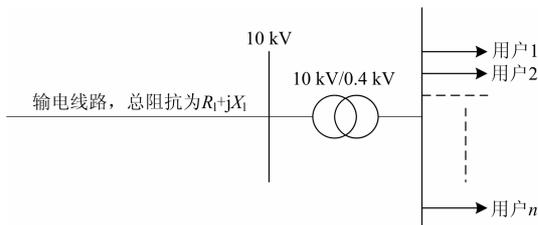


图 1 供电系统图

Fig. 1 Power supply system diagram

假设用户端用电功率分别为 $P_1、Q_1、P_2、Q_2、\dots、P_n、Q_n$ ；变压器阻抗为

$$Z_t = R_t + jX_t \quad (1)$$

设 $P_y = P_1 + P_2 + \dots + P_n$ ， $Q_y = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$ 。

则有变压器绕组的功率损耗为

$$\Delta P_t + j\Delta Q_t = \frac{P_y^2 + Q_y^2}{10^2} \cdot (R_t + jX_t) \quad (2)$$

输电线路中的功率损耗为

$$\Delta P_l + j\Delta Q_l = \frac{(P_y + \Delta P_t)^2 + (Q_y + \Delta Q_t)^2}{10^2} \cdot (R_l + jX_l) \quad (3)$$

因此系统中在变压器端和用户端均消耗有无功功率，如果把该部分需要的无功功率分别在就地提供，不需要通过电力线传输，则在同样的用电负荷情况下可以降低电流的传输，提高用户端的电压^[2-4]。

2 两级无功补偿拓扑结构及原理

为了实现配电网两级无功补偿装置的合理优化运行，提出利用两级协同优化控制算法，得出各补偿装置的最优投入无功量，实现经济和效果上的最优化^[5-7]。采用用户端就地补偿与配电端集中补偿的控制策略。集中补偿主要进行有级分段补偿，而用户端则在每一用户侧配置一套 DSTATCOM 无功补偿系统，与上级的有级补偿配合进行无级连续的快速动态补偿。其两级无功补偿电路拓扑结构如图 2 所示。图中在高压母线侧配置一套 TSC 补偿装置，用于有级无功补偿，在每一用户进线侧，配置有集成在电能计量系统内部 DSTATCOM 无功补偿装置，如图中 A1、A2、…、Nn，计量系统内部 DSTATCOM 无功补偿电路图如图 3 所示。

图 3 中，L、N 为入户 220 V 电源，L1、R1 为可变的家庭感性负载。由于感性负载在工作过程中，需要消耗无功能量，感性负载的大小不同，则消耗的无功能量大小就不同。其补偿是在入户电表计量

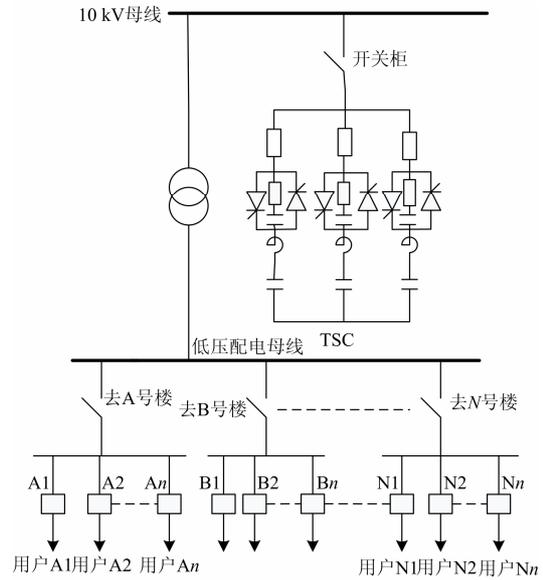


图 2 两级无功补偿电路拓扑结构

Fig. 2 Two-stage VAR compensation circuit topology

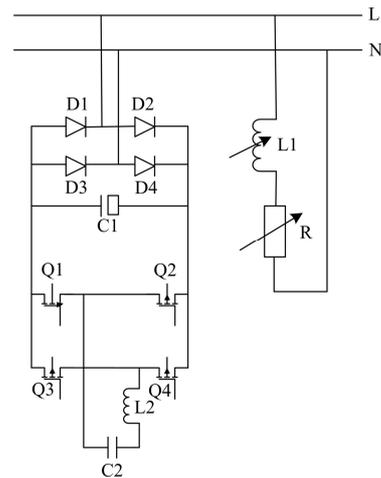


图 3 DSTATCOM 电路拓扑结构

Fig. 3 Circuit topology of DSTATCOM

处通过 D1~D4 二极管先把 220 V 交流电源整流滤波变为直流电源，然后通过 Q1~Q4 MOSFET 管把直流电源逆变为频率和电压幅值均可变交流电源施加在电容 C2、L2 两端，通过调节加在电容 C2、L2 两端的电压就可改变电容电感产生无功的大小，从而达到改变系统中无功功率的效果。

在 TSVC 系统中，TSC 能提供大容量的容性无功功率，成本较低，是离散子系统。DSTATCOM 提供较小容量的感性无功和容性无功，满足家庭内部的无功需求。TSVC 控制系统通过检测电网信息，进行计算判断 DSTATCOM 的补偿容量与 TSC 电容器组分配，经计算后给 TSC 电容器组的投切信号和

DSTATCOM的PWM触发信号, 实现了无功的快速连续大容量的补偿。

STVC系统无功补偿原理如图4所示。图中纵轴表示STVC系统可以补偿的无功电流, 其中正向表示容性无功电流, 负向表示感性无功电流; 横轴表示STVC系统所投电容器的组数^[8-9]。从图4可以看出, STVC系统可以实现无功的连续补偿, 当TSC电容器组数随所需补偿无功功率有效变化的情况下, STVC可以做到在最大容性无功和最大感性无功之间连续可调。TSC进行无功粗调, 无级的DSTATCOM进行无功精调, 当系统无功需求在*n*组和*n+1*组TSC之间时, 投行*n*组TSC, 再由DSTATCOM补偿小容量无功, 从而达到了低成本无级连续无功补偿的目的。虽然DSTATCOM能发出的感性无功功率小于容性无功功率, 但由于家庭用户对感性无功的要求补偿容量往往比较小, 所以装置能够满足实际工程的要求。

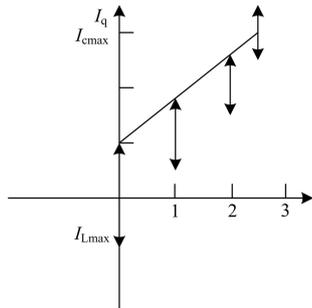


图4 STVC系统无功补偿原理

Fig. 4 VAR compensation principle of STVC

3 STVC系统控制策略

STVC是含有多组DSTATCOM和TSC的混合系统, 如何协调整个系统的连续快速补偿, 保证装置正常运行, 是该系统控制的重点和难点。本文提出了基于中央处理决策单元的STVC混合系统一体化控制方法, 其控制系统结构如图5所示。

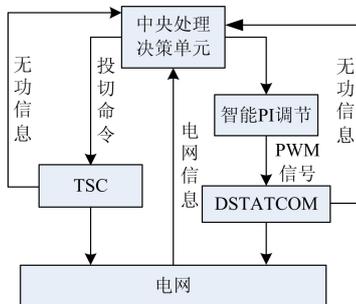


图5 STVC系统控制方案

Fig. 5 Control scheme of STVC

STVC控制策略是, 由DSTATCOM分别检测出用户端无功功率及功率因数大小, 调节PWM脉宽, 确定DSTATCOM的无功补偿容量, 然后再次检测系统中的无功情况及功率因数, 确定TSC电容的投切组数, 发出投切命令, 再次检测用户端无功功率及功率因数, 调整修正DSTATCOM的无功补偿容量。

3.1 DSTATCOM补偿原理

在图3中, 为了达到系统无功功率平衡, 需要前边的无功产生装置自动跟踪后边L1、R大小的变化^[10]。

假设系统电压为 $U_1 \angle 0$, 系统频率为 f_1 , 负载等效电阻为 R_1 、等效电感为 L_1 ; 加在补偿电容 C_2 两端的电压为 $U_2 \angle \alpha$, 两端电压频率为 f_2 。则负载所需无功功率为 Q_1 , 则有

$$S_1 = \frac{U_1^2}{R_1 + j\omega L_1} = \frac{U_1^2}{R_1 + \omega^2 L_1^2} (R_1 - j\omega L_1) \quad (4)$$

式中, S_1 为系统视在功率。

$$\omega = 2\pi f_1$$

从上可得负载所需无功功率 Q_1 为

$$Q_1 = \frac{U_1^2 \cdot \omega L_1}{R_1 + \omega^2 L_1^2} \quad (5)$$

为了保持系统无功功率平衡, 则需要电容 C_2 也要产生无功功率大小为 Q_1 , 因此可得

$$Q_1 = U_2^2 \angle 2\alpha \cdot \omega_2 C_2 \quad (6)$$

$$\frac{U_1^2 \cdot \omega L_1}{R_1 + \omega^2 L_1^2} = U_2^2 \angle 2\alpha \cdot \omega_2 C_2 \quad (7)$$

式中, $\omega_2 = 2\pi f_2$ 。

因此, 在保持电容 C_2 两端电压频率一定时, 当系统感性负载增大也即系统无功功率增大时, 只需要增大电容 C_2 两端的电压即可。也就是系统所需无功功率大小与电容 C_2 两端的端电压平方成正比。因此可以通过调节固定电容 C_2 两端的电压大小补偿系统变化的无功功率。

3.2 DSTATCOM控制策略的实现

为了减少系统电压波动或者感性负载在工作过程中的波动引起无功功率波动对控制系统的影响, 采用PI控制方式实现逆变电压的快速控制。控制结构框图如图6所示, 图中 Q_{1ref} 为无功参考值, 无功

补偿的目的使系统侧的无功尽量稳定在该值，或在
该值附近许可范围内波动。

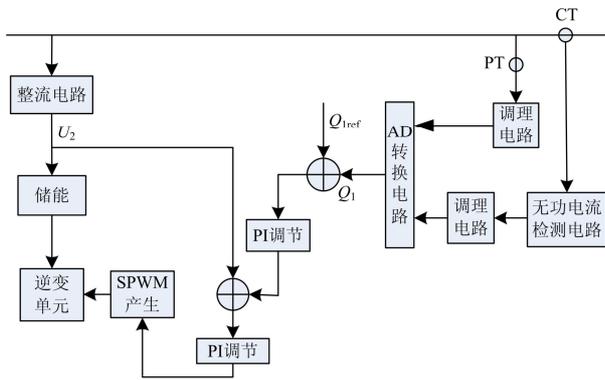


图 6 PI 控制结构框图

Fig. 6 Structure diagram of PI control

4 实验结果

根据上述理论分析，试制出一套样机系统进行
实验分析。系统中原有一台 250 kVA 变压器供给一
座教学实验楼，为了模拟系统满负荷工作，经实际
测试把测试对象用 9 台 10 kW 的电机作为低压用电
负荷。在变压器侧配置一套 TSC，在每个用电负荷
进线端加入了 DSTATCOM，实验结果如表 1 所示。

表 1 无功补偿投入前后系统参数对比表

Table 1 System parameter of before and after VAR
compensation

	投入前		投入后	
	功率因数	负荷端电压	功率因数	负荷端电压
1	0.63	363	0.97	374
2	0.65	367	0.96	382
3	0.60	357	0.95	371
4	0.66	371	0.96	377
5	0.65	355	0.94	372

从表 1 可以看出，在补偿后，功率因数得到了
明显的改善，负荷端电压也有了明显的提高。配电
网网损减少了 16.7%，系统中没有出现过补或者补
偿不足的现象。

5 结论

无功补偿不足以及有级补偿，是造成配电网能
耗高、用户端电压低的主要因素，本文提出一种有
级无功补偿与静止无功补偿混合型动态补偿系统，
结合了 DSTATCOM 连续调节无功和 TSC 有级补偿
无功的特点，系统成本与同容量的纯静止无功补偿
器相比大大降低，特别是文中提出的民用型

DSTATCOM 方案，成本很低，体积小，可以与
电度量系统结合在一起使用。本文提出采用两级
协同低压无功补偿优化方法，实现经济和效果上
的最优化。

参考文献

[1] 帅智康, 罗安, 吴传平. 一种低成本动态无功补偿装置及两级协同优化运行方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 162-170.

SHUAI Zhi-kang, LUO An, WU Chuan-ping. A novel low-cost dynamic var compensator and two-level collaborative optimization method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(12): 162-170.

[2] 熊卿, 张哲, 尹项根, 等. 新型配电变一体化静止无功补偿技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 59-64.

XIONG Qing, ZHANG Zhe, YIN Xiang-gen, et al. Research on novel technology of distribution transformer and static compensator integration system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 59-64.

[3] 焦明明, 杨仁刚, 牛焕娜. 配电网高低压综合电压 / 无功优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 227-231.

JIAO Ming-ming, YANG Ren-gang, NIU Huan-na. Voltage and reactive power integrated optimization algorithm in distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2009, 38(24): 227-231.

[4] 杨建军, 战红, 鲁成杰. 配电线路集中无功补偿优化的改进遗传算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 47-50.

YANG Jian-jun, ZHAN Hong, LU Cheng-jie. Improved genetic algorithm for centralized reactive power compensation optimization of distribution line[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 47-50.

[5] 粟然, 张孝乾, 唐凡, 等. 风电场容量比对无功补偿容量的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 20-24.

LI Ran, ZHANG Xiao-qian, TANG Fan, et al. Study on effect of wind farm capacity ratio on the capacity of reactive power compensation[J]. Power System

- Protection and Control, 2012, 40(4): 20-24.
- [6] 胡彩娥, 杨仁刚. 用电力系统分区方法确定无功源最佳配置地点[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 11(3): 46-49.
- HU Cai-e, YANG Ren-gang. Optimal allocation of reactive power sources using network partitioning[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2004, 11(3): 46-49.
- [7] 张定华, 桂卫华, 王卫安, 等. 新型电气化铁道电能质量综合补偿系统的研究及工程应用[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 189-193.
- ZHANG Ding-hua, GUI Wei-hua, WANG Wei-an, et al. Study and application of a new power quality combined compensation system for electrified railway[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 189-193.
- [8] 张勇军, 任震. 无功电压动态控制的分布式协同优化[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 34-38.
- ZHANG Yong-jun, REN Zhen. Distributed cooperative optimization for reactive power voltage dynamic control[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 34-38.
- [9] 刘其辉, 蔚芳, 康长路. 基于电网电压定向矢量变换的 SVC 平衡化补偿策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 43-47.
- LIU Qi-hui, WEI Fang, KANG Chang-lu. Balancing compensation strategy of SVC based on grid-voltage-oriented vector transformation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 43-47.
- [10] 丁心海, 王先甲, 黄涌, 等. 无功补偿调压的拓展估算模型及其试验仿真[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 94-97.
- DING Xin-hai, WANG Xian-jia, HUANG Yong, et al. Expanded estimation model of voltage adjustment by shunt VAR compensation and its dispatching experimentation and simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 94-97.

收稿日期: 2013-11-04; 修回日期: 2013-12-20

作者简介:

罗书克(1976-), 男, 硕士, 讲师, 工程师, 从事电力电子与电力传动方面的教学研究工作; E-mail: xclsk01@163.com

张元敏(1963-), 男, 教授, 研究方向为电力电子技术应用。