

电容补偿在配电网电压调节中的应用

张先泰¹, 蔡金锭¹, 丁智华², 陈廉青²

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 宁德电业局, 福建 宁德 352100)

摘要: 针对某些配电网负荷电压水平不满足要求和电压波动较大的问题, 提出基于串联电容补偿的配电网负荷电压调节与稳定方法。通过在配电线路上串入可调电容, 根据电容电压损耗与线路原电感电压损耗极性相反的特征, 在负荷波动的情况下利用电容电压抵偿线路电感电压即可调节和稳定负荷侧电压。通过实时采样负荷功率, 计算补偿电路的晶闸管触发角, 调节电容补偿量以稳定负荷侧电压。利用 Matlab 的 PSB 模块搭建了一条带有晶闸管控制串联电容补偿的配电线路, 仿真结果验证了理论分析的正确性。

关键词: 配电网; 串联电容补偿; 调压; 晶闸管; 仿真

中图分类号: TM 761

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2011)02-0116-03

电容器并联补偿是目前配电系统中较为传统的一种调压方式, 通过在负荷侧进行无功负荷补偿, 来减少配电线路上流过的无功功率^[1-2], 但是在负荷波动较大时常造成负荷侧电压严重越限, 且运行操作麻烦, 具有较大的弊端^[3]。而串联电容补偿, 通过在配电线路中串入电容, 补偿配电线路中的电抗来减少在配电线路阻抗上的电压损耗, 其具有较强的动态调压能力。电容串联补偿提高了输电网的传输功率极限, 对提高静态稳定性具有较为明显的作用^[4-6]。然而, 串联电容补偿在配电系统中的应用目前还研究甚少, 通过研究分析可知, 串联电容补偿具有较好的电压动态调节性能, 可以在配电系统的电压调节中发挥重要的作用。

1 串联电容的动态调压特性

1.1 动态调压特性的原理分析

图 1 所示为一条简易的配电线路, 其首端母线电压为 U_A , 负荷侧电压为 U_L , 线路参数为电阻 R 、电抗 X_L , 补偿电容容抗为 X_C 。

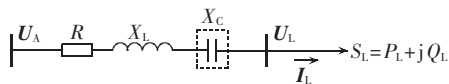


图 1 配电线路图
Fig.1 Distribution line

若忽略电压降落横向分量的影响, 线路上的电压损耗主要由电压降落纵向分量构成, 其计算公式如式(1)所示^[7]。

$$\Delta U = \frac{P_L R + Q_L (X_L - X_C)}{U_L} = \frac{P_L R}{U_L} + \frac{Q_L X_L}{U_L} + \frac{-Q_L X_C}{U_L} \quad (1)$$

由式(1)可知, 在进行串联电容补偿后, 线路上的电压损耗由电阻、电感上的电压损耗和串联电容上的电压损耗 3 部分组成, 其中串联电容上的电压

损耗为负值表示它的电压补偿性。当负荷感性无功增加时, 式(1)中的第 1 部分保持不变, 第 2 部分电感电压损耗将增加, 但是第 3 部分电容电压损耗也同时增加, 第 3 部分的增量将对第 2 部分的增量起抵偿作用。而且感性无功负荷增加得越多, 第 3 部分增量即抵偿量也越多, 第 3 部分抵偿量将随着第 2 部分电感电压损耗的增加而增加。同理, 当感性负荷减小时, 第 3 部分的抵偿量将随着第 2 部分的电压损耗减小而减小。从以上的分析可知, 当补偿电容的容抗接近于线路感抗而感性负荷变动时, 负荷侧电压的变动量将变得十分微小, 可见串联补偿电容具有自适应性的动态调压能力^[8]。

1.2 动态调压特性的数据比较分析

设图 1 中首端母线电压为 10.5 kV, 线路参数为 $R + jX_L = 3.4 + j7.6 \Omega$, 串联电容容抗 $X_C = 6 \Omega$, 保持负荷功率因数 0.9 不变, 设置不同的负荷进行电压损耗计算(忽略电压损耗横分量的影响), 通过补偿前后负荷侧电压的变化来分析串联电容的动态电压调节能力, 计算数据如表 1 所示(表中, S_L 为负荷, K_{IS} 为负荷变化率, U_L 为负荷侧电压, K_{LV} 为负荷侧电压变化率, K_r 为电压相对变化率)。

表 1 中, 负荷变化率 K_{IS} 为当前负荷与前一个负荷的差值除以前一个负荷所得到的值, 例如负荷 3 的负荷变化率 = (负荷 3 - 负荷 2) / 负荷 2。同理, 负荷侧电压变化率 K_{LV} 为当前负荷下的负荷电压与前一个负荷电压的差值除以前一个负荷电压所得到的值。电压相对变化率 K_r 为当前负荷下的负荷侧电压变化率 K_{LV} 与负荷变化率 K_{IS} 的比值, 即 $K_r = |K_{LV} / K_{IS}|$ 。从表中的数据可见, 在保持功率因数为 0.9 不变而同时增加有功、无功负荷的情况下, 补偿前的电压变化率 K_{LV} 远大于补偿后的电压变化率, 且随着负荷的增加补偿前的 K_{LV} 增大的幅度明显大于后者, 而由于补偿后串联电容的自适应性动态调压的作用, 补偿后的 K_{LV} 基本维持在 -6% ~ -4% 的水平, 负荷侧的

表 1 串联电容补偿对负荷侧电压的影响

Tab.1 Effect of series capacitance compensation on load voltage

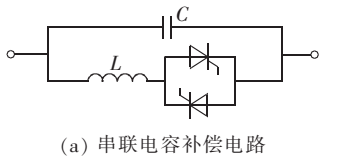
负荷序号	$S_L/(MV \cdot A)$	$K_{is}/\%$	U_L/kV		$K_{LV}/\%$		$K_r/\%$	
			补偿前	补偿后	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
1	2+j0.968		9.152	9.705				
2	3+j1.452	50.00	8.478	9.307	-7.37	-4.10	14.74	8.20
3	4.2+j2.033	40.00	7.670	8.830	-9.54	-5.13	23.85	12.83
4	5.5+j2.662	30.95	6.792	8.313	-11.44	-5.85	36.96	18.90

电压平稳性明显好于补偿前。补偿后,电压相对于负荷的变化率 K_r 随着负荷的增加并无较大的增幅,且远小于补偿前的值。此外,补偿后的 K_r 还包括有功负荷的增加在线路电阻上的电压损耗,若忽略这一部分的损耗,补偿后的 K_r 将更小,由此可以充分体现串联电容对稳定负荷侧电压的贡献。

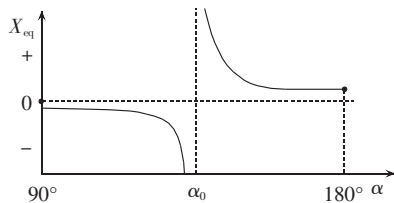
2 基于晶闸管控制的串联电容补偿

2.1 晶闸管控制的串联电容

如图 2(a)所示,可以将一电容与电感并联后,通过控制晶闸管的导通角来获得一等效电抗。改变触发角(α 角)将改变电感支路的电流,即等效地改变了电感支路感抗的大小,其变化范围从 $X_L(\alpha=90^\circ)$,晶闸管全导通到无穷大($\alpha=180^\circ$,晶闸管全关断)。因此,电感支路与电容支路并联后,整个电路的等值电抗的性质与大小都可通过控制晶闸管触发角 α 进行调整^[9-11]。当 α 角控制的等效感抗值小于电容的容抗值时,整个电路呈现感性,反之,整个电路呈现容性。且经分析^[12],整个电路的等值电抗可用式(2)计算,触发角 α 与 X_{eq} 的关系曲线如图 2(b)所示,其中 X_{eq} 为正表示整个电路呈容性,反之呈感性。



(a) 串联电容补偿电路



(b) 等效电抗示意图

图 2 串联电容补偿电路及等效电抗示意图

Fig.2 Series capacitance compensation circuit and its equivalent reactance

$$X_{eq} = \frac{1}{\omega C} - \frac{A}{\pi \omega C} [2(\pi - \alpha) + \sin 2(\pi - \alpha)] + \frac{4A}{\pi \omega C(k^2 - 1)} \cos^2(\pi - \alpha) \times [k \tan(k\pi - k\alpha) - \tan(\pi - \alpha)] \quad (2)$$

其中, $A = k^2 / (k^2 - 1)$, $k = \omega_0 / \omega$, $\omega_0 = 1 / \sqrt{LC}$ 。

2.2 触发角 α 的实时定位

通过对图 1 配电线路的电压损耗进行分析^[13],

假设负荷功率因数角为 $\theta (>0, \text{感性})$, 补偿电容后线路阻抗仍呈感性, 则以负荷电流 I_L 为参考相量, 可得到电压损耗相量图如图 3 所示。

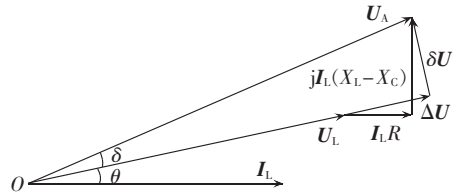


图 3 电压损耗相量图

Fig.3 Vector diagram of voltage loss

用欲实现的末端电压恒定值 U_{2b} 替换 U_L , 并把电压损耗纵向分量 ΔU 与横向分量 δU 的计算公式代入三角关系, 即可得到电容的实时补偿量计算公式如式(3)所示。

$$X_C = [(S_L^2 X_L + Q_L U_{2b}^2) - \sqrt{S_L^2 U_A^2 U_{2b}^2 - S_L^4 R^2 - 2S_L^2 P_L R U_{2b}^2 - P_L^2 U_{2b}^4}] / S_L^2 \quad (3)$$

其中, P_L, Q_L, S_L 分别为负荷的有功功率、无功功率和视在功率。把 X_C 代入式(2)中的 X_{eq} 可计算出触发角 α 的实时值。将计算出的 α 实时值对晶闸管进行控制, 即可使末端电压在变动负荷下仍然稳定在末端电压恒定值 U_{2b} 上。

3 串联电容补偿的仿真分析

采用 Matlab 仿真软件中的 PSB 电力系统模块进行仿真^[14-16], 图 1 所示配电线路的仿真实接线图如图 4 所示。

图 4 中, SCVC 为电容补偿装置, 装置内的电容 $C = 10^{-6} \text{ F}$, 电感 $L = 2 \times 10^{-6} \text{ H}$ (即图 2 中的电容电感), alpha 引脚为晶闸管触发角 α , block 为晶闸管控制使能端。alpha 模块的功能为对触发角 α 进行实时计算, Control 模块为闭环反馈控制模块, i_L 和 u_L 分别为负荷侧的瞬时电压与电流, U_{2b} 为欲实现的末端电压恒定设定值。

仿真电压源线电压为 10 kV, 采用标准线路参数 $Z_1 = 0.17 + j0.38 \Omega/\text{km}$, 配电线路长度为 10 km; 恒阻抗负荷 $S_{load1} = 12.75 + j8 \text{ MV} \cdot \text{A}$ (0 s 投入), $S_{load2} = 2.55 + j1.6 \text{ MV} \cdot \text{A}$ (0.4 s 投入), 恒阻抗负荷的计算电压取为 10 kV。SCVC 补偿装置在 0.2 s 开始投入运行, 欲实现的负荷侧恒定相电压 U_{2b} 设为 4.907 kV (即 $10/\sqrt{3} \times 0.85$), 仿真结果如图 5、图 6 所示。

从图 5、图 6 可见, 0~0.2 s 期间负荷 1 运行, 不投入补偿装置时负荷侧的相电压有效值 U_L 将由于

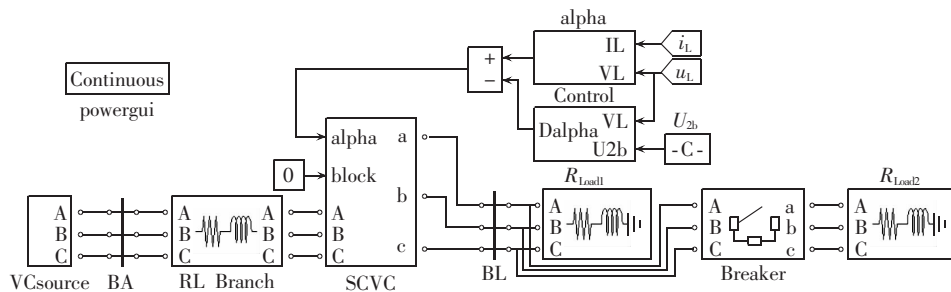
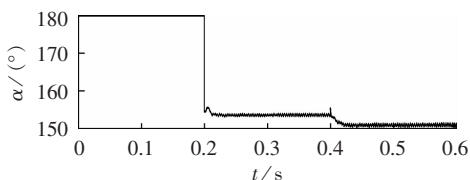
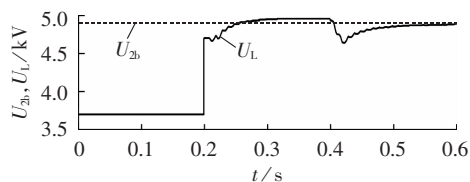


图 4 串联电容补偿仿真电路图

Fig.4 Simulation circuit of series capacitance compensation

图 5 晶闸管触发角 α 变化图Fig.5 Variation of trigger angle α 图 6 负荷侧电压 U_L 变化图Fig.6 Variation of load voltage U_L

线路的电压损耗而降至 3.701 kV;当补偿装置在 0.2 s 投入运行后,在触发角 α 约为 153.7° 的控制下,负荷侧电压升至约 4.923 kV(较接近于目标恒定值 $U_{2b}=4.907$ kV);0.4 s 后在负荷 1 的基础上再投入负荷 2,此时 alpha 模块经实时计算将触发角 α 调整减小为 149.8° ,即增大电容补偿量,负荷侧电压在短暂的下落后重新升至 4.892 kV(较接近于目标恒定值 $U_{2b}=4.907$ kV)。由此可见,当负荷波动时,经过 Control 模块的反馈控制和触发角 α 的实时计算,补偿容量将实时跟踪负荷的变化。当负荷变大时自动增大补偿容量,负荷变小时则相反,从而使得负荷侧电压基本稳定在设定的目标值上。

4 结语

从以上的理论和仿真分析可见,串联电容补偿能够显著地调节和稳定负荷侧的电压稳定水平,对配电网负荷侧的电压质量具有重要的影响和作用。在图 5 和图 6 中,由于控制系统采用的是简易的闭环电压反馈控制,触发角 α 与负荷侧电压在稳定阶段还存在较微小的波动。若对控制系统进行进一步的研究,完善 α 角的控制模块,把 PID 控制引入控制系统,将可进一步完善串联电容补偿动态调压的快速性和平稳性。显然,以上所述的串联电容补偿装置也可用于 0.4 kV 低压配电系统中,以稳定用户侧电压。

论文的研究工作得到了福建省电力有限公司科技项目基金的有力资助,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998:5-8.
- [2] 刘会金,陈琼琼,付立军. 低压配电网电容器并联补偿的性能分析[J]. 华北电力技术,1999(7):45-47.
LIU Huijin, CHEN Qiongqiong, FU Lijun. Performance analysis of parallel capacitor compensation in low-voltage distribution system [J]. North China Electric Power, 1999(7):45-47.
- [3] 崔驰. 低压配网无功补偿浅析[J]. 电网技术,2000,24(7):71-72.
CUI Chi. Analysis of reactive compensation in low-voltage distribution system [J]. Power System Technology, 2000, 24(7):71-72.
- [4] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京:中国电力出版社,1995:200-203.
- [5] 黄绍平,朱培立,彭晓,等. 高压输电系统串联电容器补偿的应用与仿真研究[J]. 湖南工程学院学报,2004,14(1):1-4.
HUANG Shaoping, ZHU Peili, PENG Xiao, et al. Application and simulating study on series capacitor compensated high-voltage transmission network [J]. Journal of Hunan Institute of Engineering, 2004, 14(1):1-4.
- [6] 孙宏国,胡国文. 10 kV 电力系统无功无级柔性补偿技术的研究[J]. 高电压技术,2005,31(12):55-57.
SUN Hongguo, HU Guowen. Research of reactive power continuous flexible compensation technology in 10 kV power system [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(12):55-57.
- [7] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京:中国电力出版社,1995:92-95.
- [8] 费希有,祁歌. 6 kV 配电线路的串联电容补偿[J]. 重庆电力高等专科学校学报,1999,4(4):1-6.
FEI Xiyou, QI Ge. The compensation condenser of 6 kV distribution [J]. Journal of Chongqing Electric Power College, 1999, 4(4):1-6.
- [9] 陈坚. 电力电子学——电力电子变换和控制技术[M]. 北京:高等教育出版社,2004:304-305.
- [10] NOROOZIAN M, ANDERSSON G. Power flow control by use of controllable series components [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3):1389-1395.
- [11] LARSEN E V, CLARK K, MISKE S A, et al. Characteristics and rating considerations of thyristor controlled series compensation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(2):992-1000.
- [12] 李国湘. TCSC 和 UPFC 在电力系统应用中的仿真研究[D]. 天津:天津大学电气工程与自动化学院,2005.
LI Guoxiang. Simulation of TCSC and UPFC applied in electric power system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
- [13] 温步瀛,江新琴,洪翠,等. 电力工程基础[M]. 北京:中国电力出版社,2006:59-65.
- [14] 吴天明,赵新力,刘建存. Matlab 电力系统设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社,2007:246-287.

- [15] 王晶, 翁国庆, 张有兵. 电力系统的 Matlab/Simulink 仿真与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 74-92.
- [16] 唐勇, 刘福斌, 邓俊雄, 等. 超高压输电系统可控串补(TCSC)动态模拟[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(6): 54-58.
- TANG Yong, LIU Fubin, DENG Junxiong, et al. Dynamic simulator of thyristor controlled series compensation in UHV transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(6): 54-58.

作者简介:

张先泰(1983-), 男, 福建将乐人, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析与配电网(**E-mail**: zhangxiantai8@126.com);

蔡金锭(1954-), 男, 福建晋江人, 教授, 博士研究生导师, 长期从事电力系统教学及人工智能技术在电力工程中的应用研究。

Application of capacitance compensation in voltage adjustment of distribution power system

ZHANG Xiantai¹, CAI Jinding¹, DING Zhihua², CHEN Lianqing²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Ningde Electric Power Bureau, Ningde 352100, China)

Abstract: The series capacitance compensation is applied to realize the load voltage adjustment and stabilization for those distribution power systems which have large voltage fluctuation or could not meet the requirement of load voltage level. The adjustable capacitor is inserted into the distribution line and its voltage is used to compensate the line inductor voltage when load fluctuates, which could adjust and stabilize the voltage. The load power is sampled and the thyristor trigger angle of compensation circuit is calculated in real time to adjust the level of capacitance compensation. A distribution system model with series capacitance compensation is built with PSB module in Matlab and the simulative result verifies the correctness of the theoretical analysis.

Key words: distribution power system; series capacitance compensation; voltage adjustment; thyristor; simulation