

低压就地无功补偿在冲击性、波动性负荷中的仿真及设计

陈 奇,陈雄伟,刘玉璞,朱 凌

(华北电力大学 电气工程学院,河北 保定 071003)

摘要: 低压就地无功补偿一般不适用冲击性、波动性变化剧烈的负荷。就此类负荷提出了一种低压就地无功补偿的设计方案,描述了装置设计与实现,包括晶闸管投切电容器(TSC)主电路设计、控制策略以及控制电路结构。通过 Matlab 仿真和采石厂实际运行,证明该设计能够快速跟踪剧烈的无功功率变化,补偿效果显著,可有效改善电压质量、提高功率因数、保证供电可靠性、降低线路损耗,补偿后平均功率因数高于 0.93。

关键词: 低压就地无功补偿;冲击性负荷;波动性负荷

中图分类号: TM 714.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)04-0056-03

三相异步电动机用电量占全国发电量的 60%~70%,而各大工矿企业又大量应用该类电机,正确采用无功就地补偿装置是降低电力系统线路损耗的有效方法。近年来,随着电力电容器制造技术和电力电子技术的巨大进步,无功补偿得到了广泛的推广应用,补偿技术也从过去的交流接触器型过渡到现在的晶闸管无触点开关。但补偿装置多面向一般的负荷,对于特殊应用场合如变化剧烈的冲击性、波动性负荷,补偿装置很难动态跟随无功功率变化,致使无功补偿效果不佳^[1-2]。

1 负荷状况

以采石加工厂负荷为例,其所用碎石机和锯切石料电机的负荷冲击性非常强,例如典型锤破电机 380 V/55 kW,8 极三相异步电机,未补偿前正常工作时,平均功率因数只有 0.33,电压波动也相当剧烈,波动范围在 380~420 V,瞬时 $U_{\min}=380$ V,每相电流波动范围更大,一般为 70~130 A(严重时可达 $I_{\min}=50$ A, $I_{\max}=180$ A),而且变化速度快、变化频繁,有功功率低负荷时只有 20 kW,而无功需求却相当大,严重时基本稳定在 80 kvar,还不包括采石厂最恶劣的情况,此类负荷对 10 kV 电网造成相当严重的冲击和波动,使电网线路损耗在最高时达到 10% 以上。

本设计即面向此类负荷而开发的快速、经济晶闸管投切电容器 TSC(Thyristor-Switched Capacitor)型动态低压就地无功补偿装置。

2 装置设计与实现^[3-5]

2.1 TSC 主电路设计

主电路设计除满足快速分级补偿外,还需考虑抑制并联电容器的投切涌流和抑制 3 次谐波等问题。主电路图如图 1 所示。

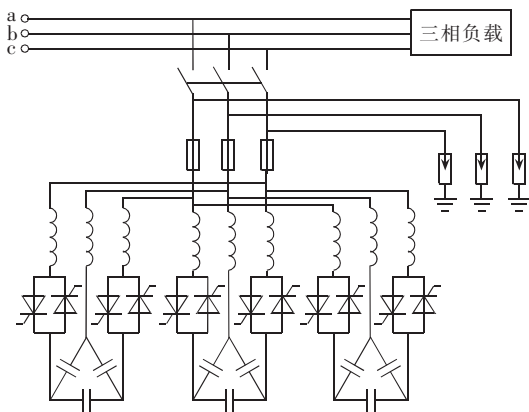


图 1 主电路图

Fig.1 Main circuit design

图中并联电容器采用不等容分组,3 组补偿容量各不相同,共有 7 种组合方式,以提高补偿精度。电容器连接方式采用三相共补方式,角型连接,3 次谐波只流通于三角形内,避免了对电网的 3 次谐波污染^[6]。控制电容器投切的无触点开关采用 2 只反并联的晶闸管组成,且晶闸管开关只需加在电路 A、C 两相上(A、C 两相断开,B 相电容肯定不会单相投入)。主电路施加正向电压且晶闸管控制极有触发脉冲信号时,晶闸管导通,电容投入电网。当没有触发脉冲时,电流过零时自然关断,从电网切除电容器。晶闸管两端并联有 RC 阻容吸收回路,抑制开关过程的瞬变电压和浪涌电流。此外,在主电路上装设有氧化锌避雷器,用于抑制操作过电压和雷击过电压,串联快速熔断器作为快速熔断保护,串接 6% 的标准电抗器,限制电容器的合闸涌流。

2.2 控制策略

控制器以无功功率为基本判据,快速跟踪系统无功功率的变化,动态地投切电容器组。为使控制更加准确和合理,无功功率控制是基础,系统电压上限值和负荷电流下限值为控制电容器投切的约束条件,以

功率因数控制避免投切震荡,即保证负荷从系统吸收无功最小的原则对电容器组进行控制,实现电容器组的智能综合控制,具体流程如图 2 所示^[1]。

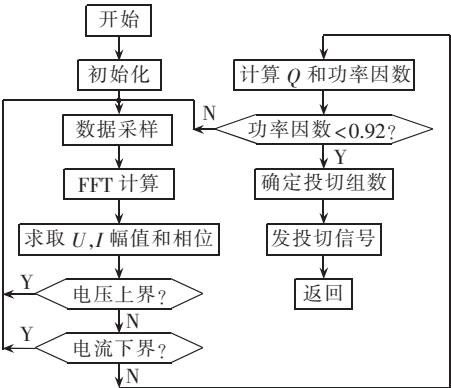


图 2 软件流程图
Fig.2 Software flowchart

首先,控制器从系统采样 U_{ac} 线电压和 I_b 线电流,三相平衡时, U_b 与 I_b 夹角为阻抗角,如图 3 所示。

当 $\lambda = \cos \varphi$ 近于 1 时, φ 角很小,因此,其测定的分辨率较低。为此,将测定 φ 角改为测量 I_b 与线电压 U_{ac} 的夹角 φ_0 ,由于 φ_0 角度大,不但分辨率高,且永为正值^[7]。其次,由 U_{ac} 经锁相电路计算出系统信号周期^[8],后由采样点数计算采样频率,以保证信号的同步采样,消除非同步采样引起的频谱泄漏,保证采样测量精确性。再次,每点采样值经采样保持器保持,当满足每个系统周期采样 64 点后,经 A/D 转换,送中央处理单元,经 FFT 计算,求每个采样点电压、电流的幅值和相位,求取 N 点均值,判断电压、电流是否越界,越界则重新采样,否则计算相应的无功功率和功率因数。最后,为防止往复投切现象产生,给出投切信号前,判断功率因数是否高于 0.92,达到则不发信号。

2.3 控制电路结构^[9-10]

控制器结构原理如图 4 所示。

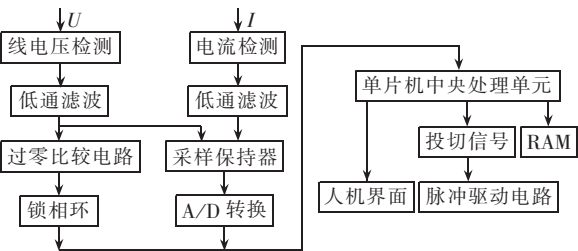


图 4 控制器结构原理图
Fig.4 Block diagram of controller

本装置选用 Cygnal 公司的 C8051F310 单片机,此单片机是完全集成的混合信号系统级芯片,具有与 8051 兼容的微控制器内核 CIP-51,与 MCS-51 指

令完全兼容。除具有标准 8051 的数字外设部件外,片内还集成了数据采集和控制系统中常用的模拟部件和其他数字外设及功能部件。单片机采用流水线结构,机器周期由标准的 12 个系统时钟周期降为 1 个系统时钟周期,处理能力大大提高,峰值性能达 25 MIPS,而平常单片机最高也未达 10 MIPS。片内 FLASH 存储器还具有在系统重新编程能力,可用于非易失性数据存储,并容许现场更新 8051 固件^[11-12]。

控制器从系统采样电压、电流,经低通滤波器,去掉其中的高次谐波分量,减少干扰,然后信号送采样保持器保持,当满足采样点数,经 A/D 变换给单片机处理,根据预先设定的控制策略发出投切信号,经脉冲触发电路,驱动晶闸管开断,即投入和切除并联电容器。其中,脉冲触发电路原理如图 5 所示,图中晶闸管两端电压经降压电阻送到光耦,当交流电压瞬时值与电容器残压相等时管

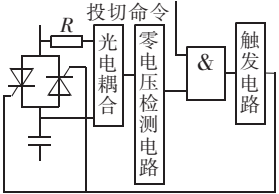


图 5 零电压触发电路原理图
Fig.5 Principle of zero-voltage-trigger circuit

3 仿真实验与实际运行^[14]

为验证装置控制策略和实际补偿效果,分别进行了计算机理论仿真和采石厂实际运行测试。装置为三相共补方式,不等容分组,每组无功容量为 20,30,40 kvar,共有 7 种容量组合方式。无功量投入按每种组合定值的 -2 ~ +8 kvar 投切,例如,若投入 50 kvar 定值无功量,则实际缺额在 $48 \text{ kvar} \leq Q_c < 58 \text{ kvar}$ 即可。仿真实际运行状况:10 kV 线路经 80 kV·A 变压器,带负荷为 380 V / 55 kW 的 8 极三相锤破电动机 1 台,380 V / 15 kW 空气压缩机 1 台,仿真图形如图 6 和图 7 所示。

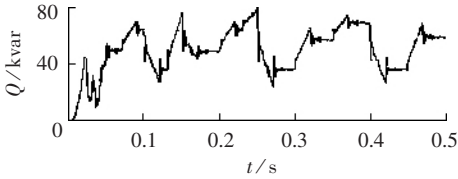


图 6 无功功率变化

Fig.6 Reactive power variation

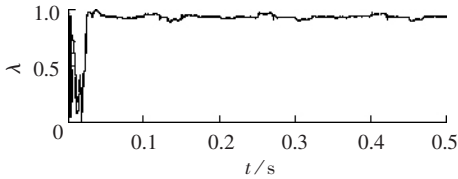


图 7 功率因数变化

Fig.7 Power factor variation

从图6可以看出,在经过大约0.05 s的启动过程之后,系统进入正常运行状态,负荷引起的无功功率缺额 Q 随时间变动剧烈,在0.5 s仿真时间内,最小达到了22 kvar,最大已经超过了80 kvar,波动范围相当大,而且波动频繁,在0.05~0.5 s范围内,均值在60 kvar左右。

其次,再看图7功率因数变化,在经过0.05 s系统启动之后,补偿装置进入正常工作状态,随系统无功缺额的变化,补偿装置适时投入或切除电容器组,补偿系统无功缺额,使功率因数能够维持在较高水平,较小范围内波动,最低值为0.89,均值达到了0.95以上,符合设计要求^[4]。

表1为实际运行测量值与理论仿真值的对比。

表1 实际测量值与理论仿真值对比

Tab.1 Comparison of measured and simulated values

无功缺额/kvar		补偿后功率因数 λ	
实际测量值	实际投入	实际测量值	理论仿真值
35	30	0.91	0.938
47	40	0.89	0.929
52	50	0.94	0.958
60	60	0.98	0.990
71	70	0.95	0.970

从表1理论仿真数据、实际运行测量数据两者变化对比可以看出,装置能够较为平滑地补偿无功缺额,而且补偿后功率因数也能保持在较高水平,变化较为平稳。但是,由于实际测量数据反映了现场实际运行情况,包含了许多不可避免的具体干扰,如装置长期运行发热等,因此补偿后功率因数较理论仿真数据偏小,属于装置设计时已考虑的变化余度之内,且功率因数均值仍达到0.93以上,证明装置有效补偿了无功缺额,抑制了无功的剧烈波动,稳定了功率因数。

4 结语

该装置在河北省井陘某采石厂实际投入运行一个月,测量不同时段无功缺额均值和补偿后功率因数均值与理论值对比可以看出,装置对于采石厂的冲击性、波动性负荷能起到良好的补偿效果,装置动作速度快、运行稳定、补偿精度高、抗干扰能力强、有效抑制了电流和电压波动,补偿后平均功率因数达到了0.93以上,满足了现场要求。

参考文献:

- [1] 谷永刚,肖国村,裴云庆,等.晶闸管投切电容器(TSC)技术的研究现状与展望[J]. 电力电子技术,2003,37(2): 85-88.
GU Yong-gang, XIAO Guo-cun, PEI Yun-qing, et al. Research status and development of thyristor switched capacitor[J]. **Power Electronics**, 2003, 37(2): 85-88.
- [2] 何一浩,王树民. TSC动态无功补偿技术述评[J]. 中国电力,2004,37(10):22-25.
HE Yi-hao, WANG Shu-min. TSC dynamic reactive power compensation's technology review [J]. **Electric Power**,

2004,37(10):22-25.

- [3] 赵广,陈建业,逯帅. 基于DSP的静止无功补偿装置控制器设计[J]. 电力电子技术,2002,36(3):1-4.
ZHAO Guang, CHEN Jian-ye, LU Shuai. Design of DSP based SVC controller[J]. **Power Electronics**, 2002, 36(3): 1-4.
- [4] 马跃东,赵济秀,张华志,等. TSC无功补偿及谐波滤波装置[J]. 冶金自动化,2002(1):45-48.
MA Yue-dong, ZHAO Ji-xiu, ZHANG Hua-zhi, et al. TSC equipment for the reactive power compensation and harmonic filtering[J]. **Metallurgical Industry Automation**, 2002(1):45-48.
- [5] 姜齐容,谢小容,陈建业. 电力系统并联补偿——结构、原理、控制与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [6] 张劲光,吴加新,张宝华. 低压型TSC主回路不同接线方式的谐波特性分析[J]. 继电器,2002,30(7):35-36.
ZHANG Jin-guang, WU Jia-xin, ZHANG Bao-hua. The harmonic characteristic analysis or various low-voltage TSC [J]. **Relay**, 2002, 30(7):35-36.
- [7] 靳龙章,丁毓山. 电网无功补偿实用技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997.
- [8] 罗平. CC4046锁相环电路及其在转速仪中的应用[J]. 国外电子元器件,2002(10):66-68.
LUO Ping. CC4046 PLL and its application in the tachometer[J]. **International Electronic Elements**, 2002(10): 66-68.
- [9] 门洪,梁志珊. 一种通用TSC型无功补偿控制器的研制[J]. 吉林电力,2002(4):20-22.
MEN Hong, LIANG Zhi-shan. Development of a kind of universal reactive-load compensation controller with thyristor switch capacitor[J]. **Jilin Electric Power**, 2002(4): 20-22.
- [10] 刘力新,李春龙,杨梅. 基于新型高速高集成度单片机C8051F060的智能功率柜[J]. 国外电子元器件,2003(11):14-16.
LIU Li-xin, LI Chun-long, YANG Mei. Intelligent power cabinet based on a new MCU C8051F060[J]. **International Electronic Elements**, 2003(11):14-16.
- [11] 李刚,林凌. 与8051兼容的高性能、高速单片机——C8051Fxxx[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002.
- [12] 潘琢金,施国君. C8051Fxxx高速SOC单片机原理及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2002.
- [13] 黄邵平,彭晓,涣喜明. TSC无功补偿装置的设计[J]. 高压电器,2003,39(6):33-35.
HUANG Shao-ping, PENG Xiao, HUAN Xi-ming. Design of reactive power compensation device[J]. **High Voltage Apparatus**, 2003, 39(6):33-35.
- [14] 吴天明,谢小竹,彭彬. Matlab电力系统设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [15] 陆安定. 功率因数与无功补偿[M]. 上海:上海科学普及出版社,2004.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

陈奇(1978-),男,河北张家口人,硕士研究生,研究方向为电机节能与控制技术(E-mail:chenqi7811@yahoo.com.cn)。



Emulation and design of local low-voltage reactive power compensation in jerky and wavy load

CHEN Qi, CHEN Xiong-wei, LIU Yu-pu, ZHU Ling

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Most of local low-voltage reactive power compensation loses its effect in jerky and wavy load. A scheme of compensator for it is presented. Its design and implementation are described, including the design of TSC main circuit, control strategy and construction of control circuit. It has been validated by simulation with Matlab and operation in practice. Results show that it follows the serious change of reactive power quickly and compensates effectively, which improves the voltage quality, elevates the power factor, ensures the power supply and decreases the line loss. After compensation, average power factor is over 0.93.

Key words: local low-voltage reactive power compensation; jerky load; wavy load