动态无功补偿装置在农村弱电网过电压工况下的应用

农村非线性生产型负荷的大量应用，对农村弱电网造成了严重的谐波、无功等电能质量问题。传统的电容补偿（FC）难以满足现场需求，动态无功补偿装置（SVG）越来越多地被用来替代电容补偿。实际应用中发现，由于现场电网电压质量远低于国家标准，标准型SVG存在逆变电压不足、频繁触发交流电网过电压故障的问题。通过修改SVG的控制策略：提高SVG直流电压稳定值、改变交流电网过电压保护逻辑，保证了装置稳定运行，取得了较好的补偿效果。

仇志凌　刘定坤　张　明/南京亚派科技股份有限公司

仇志凌/高级工程师

关键词/Keywords

动态无功补偿·
弱电网·
非线性负荷·
逆变电压不足·
电网过电压·

0　引言

随着农村经济的发展，生产型负荷数量有了较大增长，焊机、打刨机和起动机等大功率工业负载具有谐波畸变率高、功率因数低和变化速度快等特点，严重影响了农村电网的供电质量。

目前农网普遍采用传统的接触器投切电容方式进行无功补偿，并且没有串联电抗器，存在以下问题：①投切速度较慢，对变化速度较快的负载无能为力；②投切准确度较低；③无法解决谐波污染问题；④纯电容补偿存在谐波放大、谐振的风险，电容器烧毁事件时有发生[1]。

针对以上问题，南京亚派科技股份有限公司大力推广动态无功补偿装置（SVG）替代传统电容补偿（FC）方案，取得了较好的效果[2]。SVG相对于FC具有响应速度快、补偿准确度高、可滤除负载谐波及无谐振风险等优点。但在实际应用中发现，在某些弱电网环境下，存在电网电压有效值明显偏高的现象。并且，网内大量非线性负载导致电网电压波形严重畸变，进一步抬高了电网电压峰值，导致标准型SVG频繁故障停机。为此，本文提出了针对性的解决方案：提高直流电压稳定值、提高电网过电压保护值以及修改电网过电压保护逻辑，更改控制策略后的SVG长期稳定运行于现场电网环境下，并取得了较好的补偿效果。

1　SVG应用情况介绍

嘉善南西岗地区采用一台250 kV·A变压器（10 kV/400 V）给附近居民生活及工业生产供电，由于接入点距离主变电所较远及变压器容量较小，导致电网电压不稳定，存在电压有效值明显偏高的现象。同时，家庭作坊式工厂较多，负载主要为打刨机等快速变化的非线性负载，谐波畸变严重，功率因数较低。现场负载电流波形如图1所示，CH_1～CH_3分别为A、B和C三相。现场电容柜无法满足补偿要求，变压器长期存在功率因数低、谐波超标和电压波形差等问题。

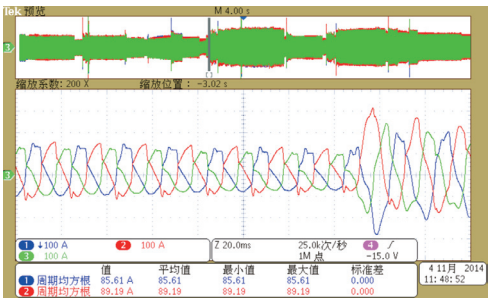

图1　现场负载电流波形

根据现场情况，南京亚派科技股份有限公司制定补偿改造方案：采用2台50 kvar SVG模块，壁挂式安装，进行动态无功补偿，提高系统功率因数，并治理系统谐波；同时改造现有电容柜，将电容柜的补偿控制信号接入SVG的中央控制器，由SVG统一协调控制电容柜的投切[3]。SVG接入系统图如图2所示。

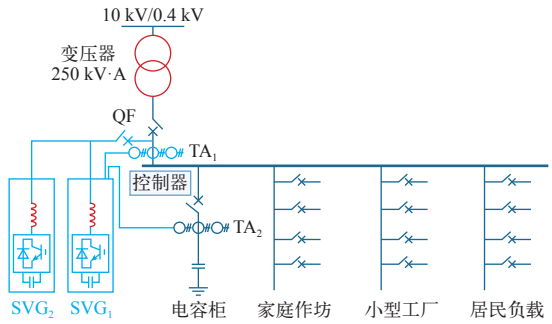

图2　SVG接入系统图

SVG设备在现场投运后发现，大量快速变化的非线性负载起动时，SVG频繁发生直流侧过电压、交流侧过电压和交流侧过电流故障，对SVG的稳定、可靠运行造成了很大挑战。图3和图4分别为负载畸变前和畸变后电压、电流波形。可以看出，电网电压波形严重畸变时，相电压峰值进一步升高，最高达到420 V，相电压有效值达到270 V，已远超出国家标准GB/T 12325—2008《电能质量 供电电压偏差》的要求[4]。

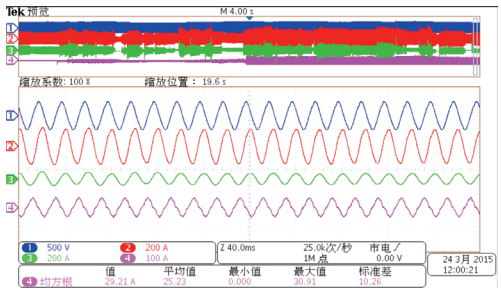

图3　负载畸变前电压电流波形

CH_1—电网电压　CH_2—系统电流　CH_3—负载电流
CH_4—SVG输出电流

根据GB/T 12325—2008要求，20 kV及以下三相供电电压偏差为标称电压的±7%，即三相380 V电压系统，标准相电压有效值最大为235 V，考虑到一定的余量，南京亚派科技股份有限公司SVG电网电压保护阈值设置为标称电压的115%，即254 V。

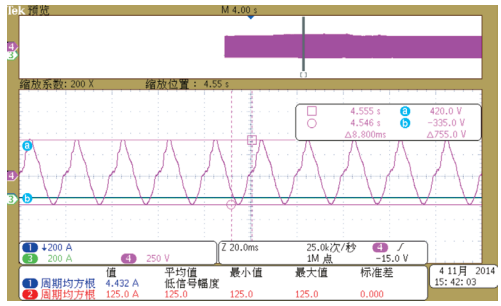

图4　负载畸变后电网电压波形

现场电网电压显然已超过SVG交流过电压保护阈值，导致触发SVG交流侧过电压保护。同时，电网相电压峰值最高达到了420 V，SVG逆变电压不足、输出电流失控，导致直流侧过电压、交流侧过电流。

因此，该现场对SVG的性能要求：能够适应现场电网电压有效值和峰值都严重超标的过电压工况。

2　问题分析

2.1　逆变电压不足问题

针对SVG频繁报直流侧过电压问题，经分析原因为现场电网电压过高，SVG出现逆变电压不足，导致过高的电压差加在SVG输出电抗上，产生较大的倒灌电流对直流侧电容产生了过充所致。

SVG主电路拓扑如图5所示。采用脉冲宽度调制技术，通过对一系列脉冲的宽度进行调制，来等效地输出所需要的电压波形（幅值和相位）[5]，三相SPWM调制原理如图6所示。南京亚派科技股份有限公司标准型SVG设计在电网过电压＋15%范围以内可以正常输出补偿。此时电网相电压有效值为254 V，峰值为359 V，因此直流半母线运行电压不能低于359 V。考虑直流半母线电容耐压为450 V，为了留有一定的安全裕量，SVG直流半母线运行电压控制在375 V。由于现场电网电压峰值最高达到420 V，远超375 V，即逆变器通过SPWM

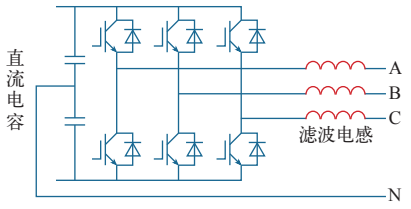

图5　SVG主电路拓扑

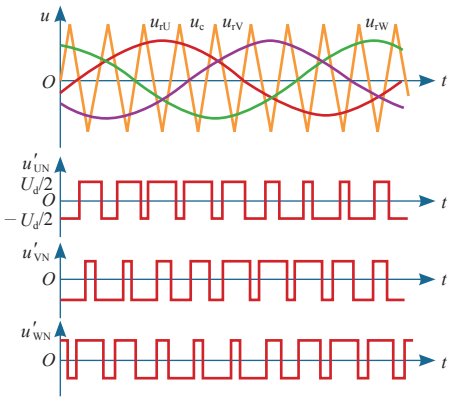

图6　三相SPWM调制原理

调制方式输出电压的最大值，导致逆变电压不足问题。

SVG输出等效电路如图7所示。其中U_i为逆变桥输出等效电压，U_s为电网电压，L_e为输出等效电感，包含了滤波电感和电网阻抗[6-7]。

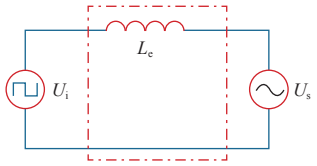

图7　SVG输出等效电路

等效关系式为

$$U_i - U_s = L_e \frac{di_e}{dt} \quad (1)$$

当电网电压峰值高于375 V时，逆变桥输出电压将维持在375 V，即U_i=375 V，此时假若U_s达到410 V，等效电感L_e约为200 μH，持续时间2 ms，则

$$\Delta I_e = \frac{\Delta t(U_s - U_i)}{L_e} = \frac{2\times10^{-3}\times(410-375)}{200\times10^{-6}}\ \text{A} = 350\ \text{A} \quad (2)$$

即SVG输出电流峰值达到350 A，远超过SVG过电流保护值（额定有效值电流75 A，保护值瞬时150 A）。同时，电流方向为电网流向逆变桥，将给直流电容进行充电，导致触发直流过电压保护。

2.2　电网过电压保护问题

根据SVG后台监控平台统计的设备故障信息，如下表所示。现场报交流电网过电压故障较多，从故障时上报数据来看，故障时三相电压中至少一相有效值在254 V以上，即超出了SVG交流过电压保护值254 V。触发电网过电压保护后，装置封锁脉冲，停止输出，进入待机状态。通常电网电压过高多为电网运行方式改变所致，南京亚派科技股份有限公司SVG出现电网电压保护后，在30 min后会自动重起，如网压恢复正常，则重新进入正常输出状态。现场由于电网电压频繁偏高，导致SVG长时间无法正常补偿，达不到较好的应用效果。

表　SVG后台监控平台统计的设备故障信息

序号	上报时间	设备故障	电网 U_a/V	电网 U_b/V	电网 U_c/V
1	2014/12/15 16：49	3：系统交流过电压	242	244	252
2	2014/12/15 16：23	3：系统交流过电压	238	240	252
3	2014/12/15 15：57	3：系统交流过电压	240	246	254
4	2014/12/15 15：35	3：系统交流过电压	238	246	252
5	2014/12/15 14：55	3：系统交流过电压	234	236	256
6	2014/12/15 14：25	3：系统交流过电压	240	248	258
7	2014/12/15 14：08	3：系统交流过电压	238	242	264
8	2014/12/15 13：58	0：无	242	238	252
9	2014/12/15 11：46	3：系统交流过电压	242	250	258

3　解决方案

针对现场SVG运行遇到的逆变电压不足和电网过电压保护问题，南京亚派科技股份有限公司对SVG的运行策略进行了调整，主要有以下两点。

1）将SVG直流半母线电压设定值从之前的375 V提高到410 V，逆变器最高410 V的电压输出能力和电网电压最高峰值420 V基本接近，大大降低了SVG出现逆变电压不足的概率，保证了装置的稳定运行。

同时由于SVG直流半母线电容耐压为450 V，考虑装置运行时直流电压会出现一定的波动，需留有一定安全裕量，因此410 V的半母线运行电压已接近极限。继续提高，存在直流电容过电压损坏风险。后续针对电网电压过高的场合，SVG可以进行定制化设计，将直流半母线电容耐压提高到500 V。这样，直流半母线运行电压可以设定在450 V，能够完全解决逆变电压不足问题。

2）将电网过电压保护值从254 V提高到264 V，降低电网过电压故障触发频率。同时将电网过电压保护自恢复时间缩短为3 min，且取消自起动次数限制，保证装置触发电网过电压故障后可尽

快重新起动，并且消除了多次故障导致的装置停机，保证SVG长期持续运行。

4　治理效果

经过在现场对SVG运行策略进行调整后，实现了SVG稳定、可靠运行，并发挥了最大补偿能力。其中负载快速变化时SVG补偿波形如图8所示，可以看出，SVG能够实时动态地跟踪负载无功电流变化，在负载快速变化时，SVG能够迅速响应进行补偿，同时当需要补偿的无功电流超过SVG额定电流值时，SVG输出电流限制在额定电流值75 A。

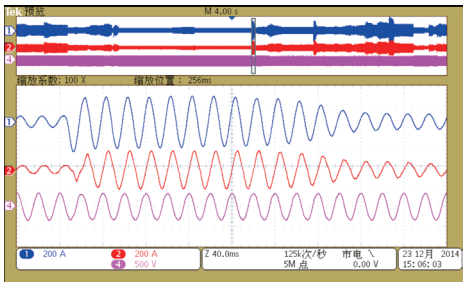

图8　负载快速变化时SVG补偿波形

CH_1—负载电流　CH_2—SVG补偿电流　CH_4—电网电压）

图9为电网电压畸变严重，幅值较高时SVG输出电流波形，从图9中可以看出，电网相电压畸变后峰值已达到395 V，SVG仍然可以正常输出补偿电流，不会因逆变电压不足而出现直流过电压或交流过电流故障停机。

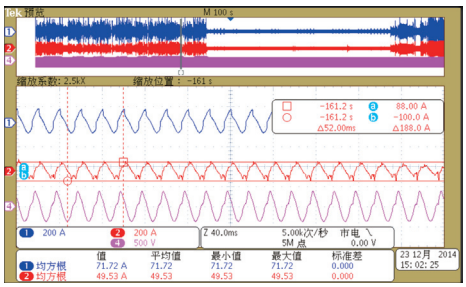

图9　电网电压幅值高时SVG补偿波形

CH_1—负载电流　CH_2—SVG补偿电流　CH_4—电网电压

图10为某供电公司提供的功率因数合格率，从供电局后台提供数据来看，SVG运行策略改进后的无功补偿合格率五个月保持100%，达到了很好的应用效果。

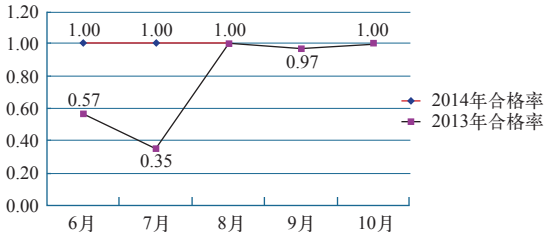

图10　某供电公司后台监测的功率因数合格率

5　结束语

随着农村经济的发展，大量工业生产负荷的出现，农村电网功率因数低、谐波超标等问题愈发严重。传统的电容补偿无法满足应用要求，采用新型的SVG已是趋势。同时，SVG的运行策略需要进行调整，以适应农网较为薄弱的电网环境及非线性负载较重的场合。本文提出通过提高SVG直流侧电压运行值及放宽电网过电压保护门槛的方法，解决了SVG出现逆变电压不足、频繁触发电网过电压故障导致的装置停机，保证了SVG的稳定、可靠运行。得到了较为理想的无功补偿效果。

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．

[2]　张文亮，汤广福，查鲲鹏，等．先进电力电子技术在智能电网中的应用 [J]．中国电机工程学报，2010，30 (4)：1-7．

[3]　徐永海，肖湘宁，杨以涵，等．低成本混合滤波方案及特性分析 [J]．中国电机工程学报，1999，19 (12)：5-8．

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

[5]　张崇巍，张兴．PWM整流器及其控制 [M]．北京：机械工业出版社，2003．

[6]　徐德鸿．电力电子系统建模及控制 [M]．北京：机械工业出版社，2005：187-189．

[7]　杨淑英，张兴，张崇巍，等．LCL滤波电压源并网逆变器多环控制策略设计 [J]．电力系统自动化，2011，35 (5)：66-70．

（收稿日期：2017－10－25）EA