

冲击性负荷接入220 kV电网的电能质量治理应用研究

李 斌¹, 刘群英²

(1.中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000; 2.电子科技大学自动化工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 大量冲击性负荷接入电网, 对电能质量造成严重影响。对接入大规模冲击性负荷的 220 kV 电网的电能质量问题及原因进行分析, 提出分层治理模式, 按层配置无功补偿装置, 设计了由晶闸管投切电抗器 (Thyristor Controlled Reactor, TCR) 和静止无功发生器 (Static Var Generator, SVG) 进行无功补偿和控制的电能质量治理方案。通过对装置补偿原理的应用、补偿控制点的设定、补偿环节和过程的精准控制以及补偿容量与大小的确定实现了功率因数的补偿, 改善了电压骤降及谐波问题, 并取得良好经济效益。仿真试验和实践结果证明所提补偿模式和治理方法的有效性和正确性。

关键词: 冲击性负荷; 电能质量; TCR; SVG; 控制; 补偿

Application research on power quality control of impact load connected to 220 kV grid

LI Bin¹, LIU Qunying²

(1.China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China; 2. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: A large number of impact loads are connected to the power grid, which seriously affects the power quality. The power quality problems and causes of the 220 kV power grid connected to large-scale impact loads are analyzed, and the hierarchical controlling mode is proposed, and reactive power compensation devices are configured according to the layer. A power quality management scheme is designed for reactive power compensating and controlling by Thyristor Controlled Reactor (TCR) and Static Var Generator (SVG). Through compensation principle application of the devices, the setting of compensation control point, the precise control of compensation link and process, and the determination of compensation capacity and size, the power factor compensation is realized, and voltage drop and harmonic problems are improved, and good economic benefits are obtained. The effectiveness and correctness of proposed compensation mode and controlling method are proved by simulation and practice results.

Key words: impact load; power quality; TCR; SVG; control; compensation

0 引言

随着现代工业的进步与发展, 当冲击性负荷 (如电弧炉、整流器和大型电动机等) 瞬间容

量变化很大且非线性的负荷接入电网时, 电压波动与闪变、电压暂降、谐波以及功率因数等电能质量问题相继出现, 给电力系统和用电设备造成

危害,轻则增加损耗,导致设备发热,降低设备使用效率,影响效益;重则造成设备停顿或误动作,引起停电事故甚至烧毁设备,影响电网安全。因此,对冲击性负荷引起的电能质量问题开展研究并积极治理,有利于电力系统的安全稳定运行。

大量冲击性负荷接入电网后引起的电能质量问题日益突出,用户对供电质量的要求也逐步提高,学术界开始更多地关注冲击性负荷及其电能质量问题。文献[1-2]指出大量非线性、冲击性负荷会造成电网电能质量的恶化,对冲击性负荷的检测、评估与治理进行了研究;文献[3-5]着重分析了多种冲击性负荷,如电弧炉、中频炉和牵引负荷等的电能质量特性,得出其谐波含有率、电压波动和闪变数据等;文献[6-8]通过建模仿真的方法分析了冲击性负荷对电网造成的电压波动、闪变和谐波等电能质量问题;文献[9-12]主要研究了冲击性负荷引起电能质量问题的治理方法,对无功配置进行分析,提出采用SVC或SVG对煤矿供电系统、电气化铁路等冲击性负荷集中区域的电能质量问题进行治理。

以上文献对冲击性负荷的危害、电能质量特性和治理措施等做出了全面详尽的描述,理论分析和研究性成果较多,但在处理实际问题方面论述不够充分,或者治理方法偏单一化。本文立足于含有多种冲击性负荷的某地220 kV实际电网,针对冲击性负荷引起的电压暂降、谐波超标和功率因数偏低等电能质量问题及原因进行分析,根据实际情况提出分层治理模式,按层配置无功补偿装置,设计了由TCR和SVG构成的无功治理方案,主要包括TCR和SVG的补偿应用原理、补偿控制点的设定、补偿环节和过程控制以及补偿容量与大小的确定等详细内容,综合利用无功补偿与控制方法对电能质量问题进行治理。仿真试验表明方案的合理性,应用实践后电能质量得到有效治理,并改善了经济效益。

1 220 kV电网的电能质量

220 kV电网主要包括220 kV变电站及所属

的35 kV、10 kV负荷,220 kV变电站的电源通过上级500 kV变电站的220 kV出线间隔的双回架空输电线路引入,该电网的35 kV、10 kV分别带有整流变压器(AC/DC)和大量冲击性负荷,TCR、SVG分别接于10 kV母线,接线如图1所示。

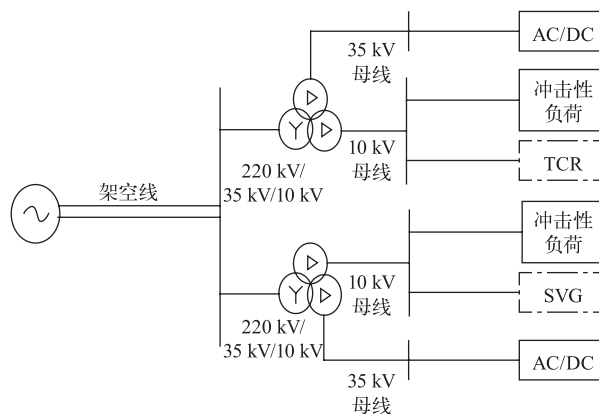


图1 220 kV电网接线

Fig. 1 220 kV grid connection

该电网的电压和谐波问题比较突出,当所带大型电动机、可变负荷/变速驱动、电弧炉、整流器、换流器和焊接设备等大型冲击性负荷启动时,会引起功率大幅度波动(尤其是无功功率),继而引起电压幅值变动,导致电压暂降、谐波等问题的发生。经长期监测发现,当大型负荷启动时,该电网10 kV母线电压暂降严重,电压瞬时下降至母线电压的80%左右,持续时间10 ms~60 s;10 kV电压电流的3、5、7、11和13次谐波远超过限值。

功率因数偏低也是该电网长期存在的主要问题,这主要是由于220 kV输电线路在运行过程中对地电容产生了大量充电功率,此时电流相位超前于电压相位,输电线路电压远高于电源电压,输电线路相当于无功电源,不断地向上级电网倒送无功。虽然该电网网架建设规模超大,但日常平均负荷过小(呈感性),甚至不到主变压器容量的10%。过小的负荷不足以抵消平衡大量的容性无功,以至功率因数偏低。经实际测量,该电网向上级电网反送的实时无功电量大约为4 Mvar,月平均功率因数仅在0.3左右。

2 无功配置分析

虽然该电网的电能质量问题比较复杂,但主要由无功问题所引起。无功提倡就地平衡,为保证治理效果,考虑按220 kV、10 kV两个电压等级的电能质量情况分别配置无功补偿装置。

为解决功率因数偏低的问题,需要增加电抗器消耗线路产生的无功,或者采用无功相互抵消平衡的办法。主要有两种方案:一是在220 kV输电线路侧增加电抗器;二是采用无功补偿设备。经过充分的比较和论证发现,第一种方案建设周期长、投资大以及电压高,不容易实现;第二种方案主要考虑改造变电站站内现有的10 kV TCR补偿装置,重新设置控制目标补偿消耗220 kV输电线路多余的无功就能实现无功平衡,只须改变TCR设备参数,改接二次线,在程序和逻辑上做一些调整,费用小,较容易实现。

为解决电压和谐波问题,拟采用SVG进行补偿。相比SVC,SVG具有更快的响应速度,响应时间一般在10 ms以内,而SVC响应时间为20~40 ms,因此SVG更适合抑制电压波动。SVG还能有效抑制谐波,使3、5、7、11和13次高次谐波降低到可接受的范围,而SVC本身会产生一定的谐波。采用SVC还需要加装电力滤波器(Power Filters, PF)滤除谐波。SVG能提供一定的有功功率,减小有功功率冲击;SVC则只能提供无功功率;SVG体积小,占地面积远小于SVC。

3 TCR的补偿方案

3.1 TCR的补偿原理

TCR由正反向并联的晶闸管与电抗器串联组成,其接线如图2所示。TCR通过控制与相控电抗器连接的正反并联晶闸管对移相触发脉冲改变电抗器等效电纳的大小,输出连续可变的感性无功。这种输出能力主要依靠TCR晶闸管触发角 α 调节电抗器电流的大小得以实现。晶闸管触发角 α 的有效移相范围为 $90^\circ \sim 180^\circ$ 时,发出的感性无功最大,对应晶闸管完全导通; $\alpha=180^\circ$ 时,晶闸管完全截止,相当于电抗器不投入运行,发出

的感性无功最小; α 可在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 范围内调节,此时感性无功在最大值和最小值之间变化。依靠TCR的这种调节能力,可以实现感性无功的实时、动态和连续调节,抵消平衡220 kV输电线路中多余的容性无功,解决功率因数低的问题。

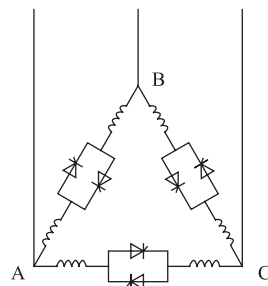


图2 TCR接线

Fig. 2 TCR connection

3.2 TCR的控制逻辑

TCR原有控制目标设于10 kV母线处,调整后设于220 kV出线侧,TCR的控制逻辑如图3所示。首先采集220 kV变电站220 kV侧输电线路的电压和电流信号,分别进行有效值转化,经过加法器实现基频电压和电流运行曲线功能,得到瞬时的受控电压和电流信号。将得到的瞬时电压和电流值与参考值比较后送入比例积分微分(Proportion Integration Differentiation, PID)控制环节和线性化处理环节,其中线性化处理环节是为了使PID控制环节产生的等效电纳与TCR的移相角度对应而设置,最后得到晶闸管所需要的电信号,从而控制无功输出量,实时调节补偿的无功功率。

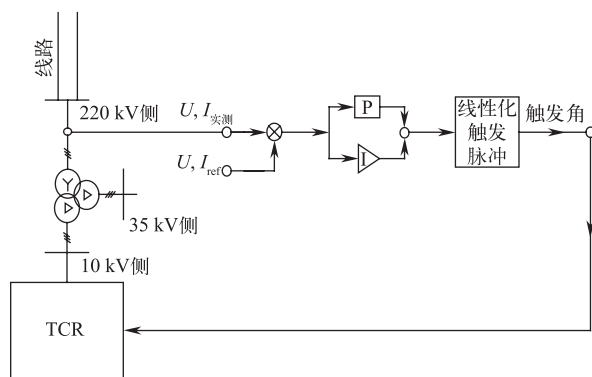


图3 TCR闭环控制逻辑图

Fig. 3 TCR closed-loop control logic diagram

3.3 TCR的容量与调节

220 kV 电网总无功功率为 Q_Z ，线路产生的无功功率为 Q_C ，负载无功功率为 Q_F ，TCR 补偿的感性无功功率为 Q_{TCR} ，其关系式为

$$Q_Z = Q_F + Q_C + Q_{TCR} \quad (1)$$

在实际运行中， Q_C 、 Q_F 处于动态，即不断变化，通过调节 Q_{TCR} ，使 Q_Z 基本为零，即可实现无功平衡。

TCR 输出容量与触发角的关系为

$$B_{TCR(\alpha)} = \frac{1}{X_L} \left(2 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{\pi} \right) \quad (2)$$

$$Q_{TCR} = U^2 B_{TCR} \quad (3)$$

$$Q_{TCR} = U^2 \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi X_L} \quad (4)$$

式中， α 为 TCR 触发角， $(^\circ)$ ； U 为工作线电压，kV； X_L 为 TCR 支路电抗， Ω ； B 为线路电纳。

10 kV TCR 的容量为 30 Mvar，电感为 2×9.12 mH，调节 TCR 不同的触发角，输出不同的无功功率，当触发角 $\alpha = 147^\circ$ 时， $Q_{TCR} = 4$ Mvar，此时 $Q_Z \approx 0$ ，无功基本达到平衡，即可实现 220 kV 线路无功的补偿与平衡。

4 SVG 的补偿方案

4.1 SVG 的补偿原理

SVG 的基本原理是将自换相桥式电路通过电抗器或变压器并联到电网上，适当地调节桥式电路交流侧输出电压的幅值和相位，或直接控制其交流电流，使该电路吸收或者发出满足要求的无功电流，实现无功功率的动态输出。SVG 的拓扑结构如图 4 所示，包含晶闸管逆变桥和电容两个部分，逆变桥从交流系统吸取少量有功功率，对电容 C 充电，保持电压稳定。系统电压为 U_s ，SVG 电压为 U_1 ， $U_1 = U_s$ ，SVG 不补偿； $U_1 > U_s$ ，SVG 输出容性无功； $U_1 < U_s$ ，SVG 输出感性无功。依靠 SVG 的无功输出能力，可以快速地补偿冲击性负荷引起的无功功率变化，达到电压调节的目的。

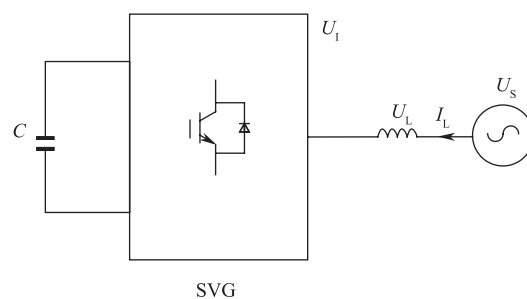


图 4 SVG 拓扑图

Fig. 4 SVG topology graph

4.2 SVG 的控制模式

SVG 补偿控制点设于 10 kV 母线处，采用正弦脉冲宽度调制（Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM）技术对交流侧输出的无功电流波形的瞬时值进行反馈控制，SPWM 采用适用于连续时域控制的三角波技术。SVG 控制过程如图 5 所示，SVG 发出的三相电流瞬时值经过 abc-dq 坐标变换为有功电流 I_d 和无功电流 I_q ，与有功电流参考值 I_{dref} 和 I_{qref} 作差后，分别经 PI 调节器得到电压指令信号 U_d 和 U_q ，再经 dq-abc 反变换，得到三相电压信号 U_a 、 U_b 和 U_c ，通过恒频三角波比较生成变流器触发信号控制 SVG 各开关器件的导通与关断。SVG 采用电流直接控制的方式，能检测出负荷电流中的谐波分量，并产生宽频脉冲调制信号，将其反极性后作为补偿电流的指令信号，所产生的补偿电流与负荷电流中的谐波分量大小相等、方向相反，能将谐波抵消并抑制到可接受的范围。

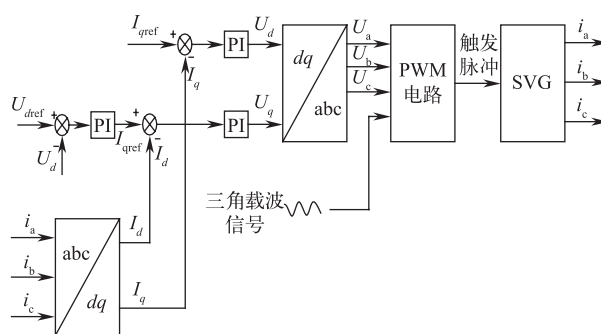


图 5 采用 SPWM 技术的电流直接控制图

Fig. 5 Direct current control diagram using SPWM technology

4.3 SVG 的容量与调节

当冲击性负荷起动时，在冲击短时间内会出

现有功和无功需求的快速增长。设10 kV负荷引起的无功变化量为 Q_F ，SVG发出的无功为 Q_{SVG} 。 Q_F 变化时， Q_{SVG} 随负荷无功变化而输出无功，即 $Q_{SVG}+Q_F \approx 0$ ，当负荷无功变化与补偿的无功功率基本平衡时，电压就会保持稳定。

系统负荷变化时， $\Delta U \ll U$ ，假定 $R \ll X$ ，系统无功功率 Q 突然增加，系统电压下降。由电力系统分析可知，电压的特性曲线可近似由表示为

$$U = U_0 \left(1 - \frac{Q}{S_{SC}}\right) \quad (5)$$

式中， U 为负荷变化后的线电压，kV； U_0 为系统初始线电压，kV； Q 为系统无功功率，MV·A； S_{SC} 为系统短路容量，MV·A。

因此，可得出无功与电压的变化量关系为

$$\Delta Q = -\frac{\Delta U}{U_0} S_{SC} \quad (6)$$

式中， ΔQ 为系统无功功率变化量，MV·A； ΔU 为系统线电压的变化量，kV。

该电网10 kV侧的短路容量为250 MV·A，当冲击性负荷起动时， ΔU 的统计值最大约为1.4，经计算可得， $\Delta Q \approx 35$ Mvar。经计算得知，冲击性负荷起动引起无功变化量最大约为35 Mvar，综合考虑负荷变化情况，采用18 Mvar 的两组SVG，补偿容量总计36 Mvar。

5 效果分析

在MATLAB/Simulink平台上构建了TCR、SVG的无功补偿模型，并进行了仿真试验，仿真结果如图6、图7所示。图6中补偿前功率因数在0.1~0.8之间波动，波动范围很大，TCR补偿后功率因数在0.95~1之间波动。图7中，当冲击性负荷起动时，电压幅值从0.1 s衰减发生起，需要到1.0 s时才能恢复正常值；SVG补偿后在0.5 s内将骤降的10 kV母线电压由0.8 (pu) 抬升至1.0 (pu)，大大缩短了恢复时间。

根据电力系统运行要求，工业用户功率因数应达到0.9以上，低于此值则需要缴纳相应的力调电费。该电网原先月平均功率因数长期远低于0.9，除缴纳正常电费外，每月还需要多

缴纳60~70万元力调电费。TCR改造投入使用后，经过长达一年的时间监测，该电网无功总体上基本达到平衡，月平均功率因数达到0.95以上，功率因数低的问题得到彻底解决，经测试表明TCR产生的谐波也在国家标准范围内。在经济上，每月不仅免除了多缴纳的几十万元力调电费，而且因功率因数优良还额外获得奖励电费1~3万元。

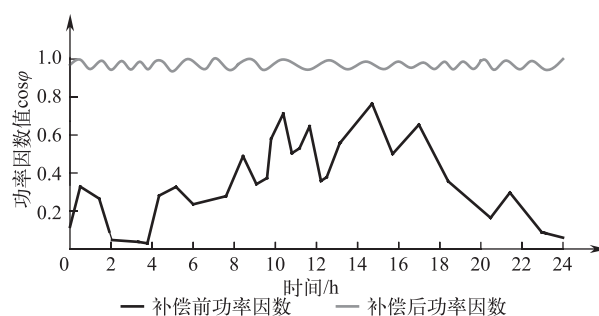


图6 TCR补偿前后功率因数

Fig. 6 Power factor value before and after TCR compensation

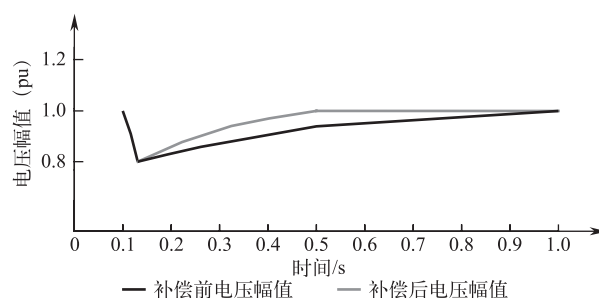


图7 SVG补偿前后电压幅值

Fig. 7 Voltage amplitude before and after SVG compensation

在实际工作中，SVG会自动起动，并实时调节输出以实现无功补偿。SVG有恒无功、恒功率因数和恒电压三种控制模式，选用恒无功模式自动调整SVG的无功输出以快速补偿冲击性负荷引起的无功功率变化，SVG投入前后10 kV无功功率变化曲线如图8所示。SVG投入使用后极大地提高了系统的电压稳定性，对电压骤降、波动和闪变起到了很好的调节作用，10 kV电压波动曲线如图9所示，10 kV电压闪变曲线如图10所示。同时，SVG对10 kV谐波电流和谐波电压也起到抑制作用，并达到了国家标准要求。SVG投入前后谐波电流指标见表1，谐波电压指标见表2。

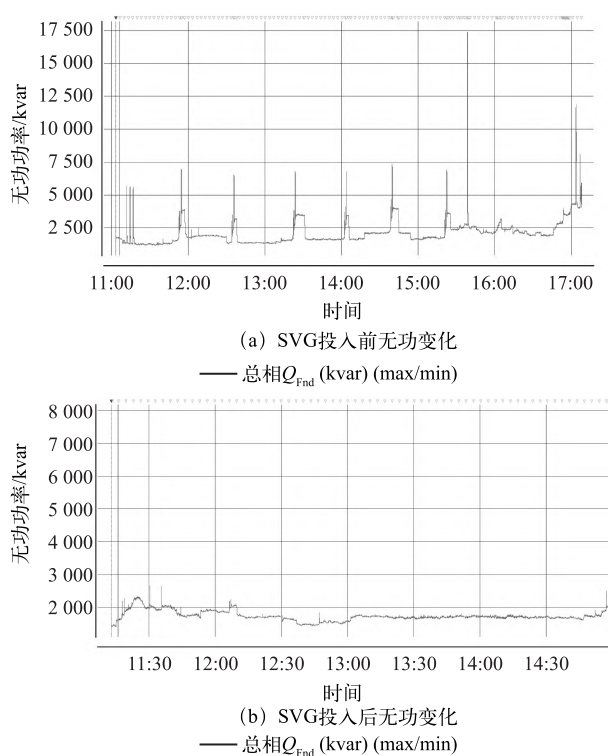


图 8 SVG 投入前后无功变化

Fig. 8 Reactive power change before and after SVG input

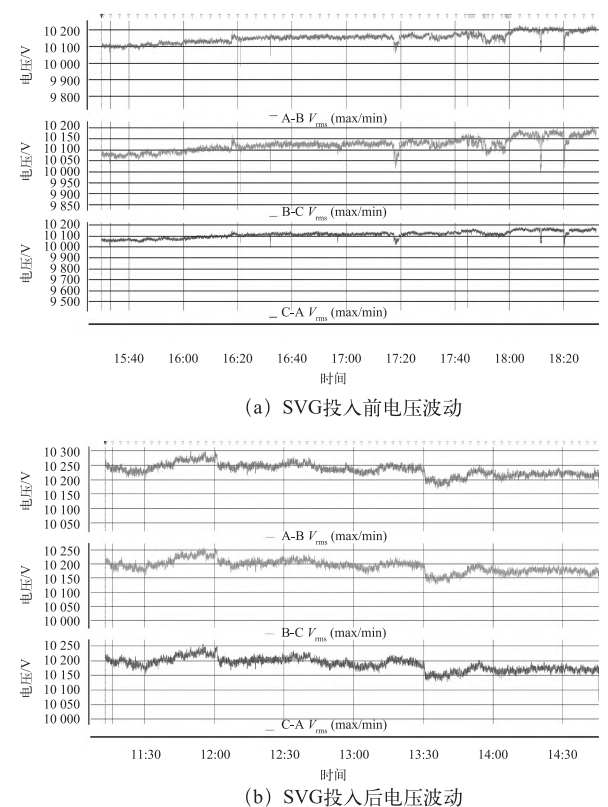


图 9 SVG 投入前后电压波动

Fig. 9 Voltage fluctuation before and after SVG input

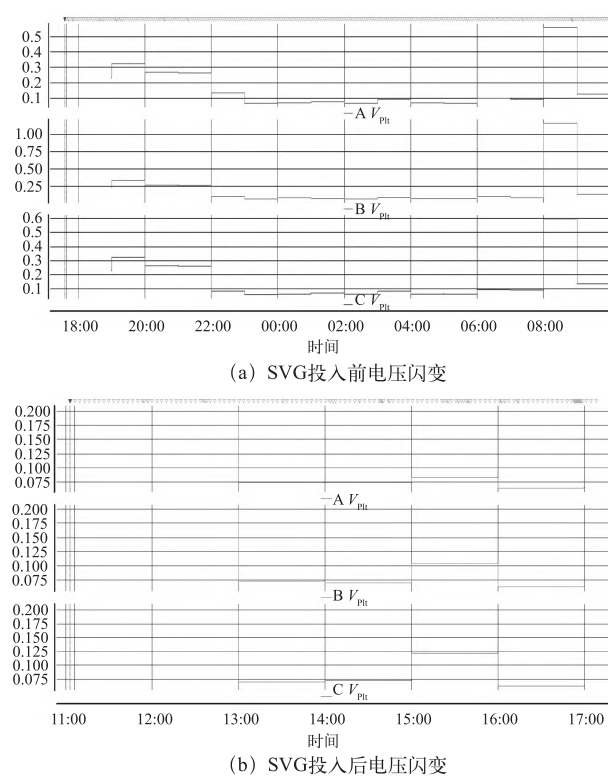


图 10 SVG 投入前后电压闪变

Fig. 10 Voltage flicker before and after SVG input

表 1 SVG 投入前后谐波电流

Tab. 1 Harmonic current before and after SVG input

(单位: A)

谐波电流 谐波次数	SVG 投入前	SVG 投入后	允许值
3	62.89	43.74	50
5	53.67	38.09	50
7	39.95	24.69	37.5
11	30.07	18.43	23.25
13	20.01	9.07	19.75

表 2 SVG 投入前后谐波电压

Tab. 2 Harmonic voltage before and after SVG input

(单位: pu)

谐波电压	SVG 投入前	SVG 投入后	国标限值
总畸变率	4.50	3.71	4.0
奇次	3.67	2.89	3.2
偶次	1.79	1.14	1.6

6 结束语

冲击性负荷接入电网后引起的电能质量问题给电力系统的安全稳定运行带来极大影响和危害。在存有多种电能质量问题的某地 220 kV 电网, 设计了按层配置无功补偿装置的电能质量治

理方案。PID闭环控制环节的构成实现了10 kV TCR对220 kV输电线路功率因数的实时动态补偿；SPWM电流反馈控制以及信号与恒频三角波比较生成脉冲波形技术的采用，实现了SVG无功输入输出的精准控制，从而改善了10 kV电压骤降和谐波问题。仿真试验表明方案的有效性与准确性，方案实施后显著提升了电能质量，并取得良好的经济效益。该电网的情况比较特殊，其补偿方法和治理模式对于处理电能质量问题具有较强的实际应用价值和借鉴意义。

参考文献

- [1] 姜齐荣. 大型非线性负荷电能质量问题及治理技术[J]. 电气应用, 2021, 40(4): 4-6.
- [2] 郑伟, 周喜超, 安哲, 等. 电网特殊负荷的电能质量管理[J]. 电力建设, 2011, 32(11): 81-84.
- [3] 刘书铭, 李琼林, 陈栋新, 等. 中高压配电网非线性用户的电能质量特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 150-155.
- [4] 张源渊, 徐永海, 杨超颖, 等. 典型干扰源电能质量特性分析与治理措施研究[J]. 电气应用, 2013, 32(21): 77-83.
- [5] 郑伟, 丁宁, 周喜超, 等. 多种特殊负荷集中区域电网的电能质量问题分析[J]. 电气自动化, 2012, 34(1): 4-7, 13.
- [6] 管伟翔, 钱君霞, 王亮, 等. 接有冲击性负荷的微电网电能质量分析[J]. 南京师范大学学报, 2019, 19(4): 8-12.
- [7] 彭卉, 邹舒, 付永生, 等. 冲击负荷接入电网的电能质量分析与治理方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 54-61.
- [8] 陶冶, 夏屹, 肖凌. 试验站冲击负荷对电网的电能质量影响分析[J]. 电工电气, 2017(1): 55-58.
- [9] 江浩侠, 曹琪娜, 李桂昌, 等. 针对冲击性负荷接入配电网的无功配置方法[J]. 机电工程技术, 2018, 47(6): 154-159.
- [10] 游步新, 张定宇, 郑连清. 基于SVC的电能质量分析与控制[J]. 电工技术, 2011(11): 70-72.
- [11] 侯卫良, 孙徐龙, 何欢. 现代电气化铁路对电网电能质量影响及其治理[J]. 供用电, 2011, 28(6): 4-7.
- [12] 杨志勇. 煤矿供电电能质量分析及治理办法研究[J]. 能源与节能, 2018(2): 95-96.
- [13] 马骞, 刘洪涛, 黄河, 等. 静止无功补偿装置在南方电网中的应用[J]. 南方电网技术, 2011, 5(2): 17-21.
- [14] ASHOUK H A, IBRAHIM K A. Comparison analysis of AC voltage controllers based on experimental and simulated application studies[C]. The 2006 International Conference on Computer Engineering and Systems, 2006: 79-85.
- [15] TAPIA G, GARCIA N. Comparative time domain modelling and analysis of a single-phase TCR[C]. Fourth Congress of Electronics, Robotics and Automotive Mechanics, 2007: 663-668.
- [16] ARGUENCE O, RAINSON B, CADOUX F. Comment on impact of load frequency dependence on the NDZ and performance of the SFS islanding detection method [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 9(9): 101-114.
- [17] VORAPHONPIPUT N, CHATRATANA S. STATCOM analysis and controller design for power system voltage regulation[C]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, IEEE/PES, IEEE, 2005: 1-6.
- [18] 罗晓东. 变电站无功补偿技术现状分析与SVG技术应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [19] 栗时平, 刘桂英. 静止无功补偿技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.

作者简介

李斌(1977—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析计算, 电力系统稳定与控制。

刘群英(1977—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定与控制分析。

(收稿日期: 2022-08-12)