

动态无功补偿装置在特殊供电负荷中的应用研究

左龙 吴晓蓉 林波 郭明阳

(四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘要: 为便于装置型式选择,回顾常见特殊负荷引起的主要电能质量问题及动态无功补偿装置应用情况,分析动态无功补偿装置(SVC、SVG)的基本原理、组成型式,总结其特点与应用场合并详细介绍了PSD-BPA仿真软件中关于SVC、SVG的仿真控制模型。通过对薄弱电网某工程案例的仿真分析,结果表明,电压稳定性主要与动态无功补偿装置容量有关,在容量确定的情况下,可以通过优化控制参数来减小电压波动。

关键词: 特殊供电负荷; 动态无功补偿装置; 电压稳定性; 电压波动; PSD-BPA

中图分类号: TM761.12 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)04-0024-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.04.006

Application Research of Dynamic Reactive Power Compensation Device in Special Power Supply Load

Zuo Long, Wu Xiaorong, Lin Bo, Guo Mingyang

(Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In order to facilitate the selection of devices, the main power quality problems caused by common special loads and the application of dynamic reactive power compensation devices are reviewed. The basic principles and composition types of dynamic reactive power compensation devices (SVC, SVG) are analyzed. Their characteristics and applications are summarized. The simulation control model of SVC and SVG in PSD-BPA simulation software is introduced in detail. Through the simulation analysis of a project case of weak grid, the results verify that the voltage stability is mainly related to the capacity of dynamic reactive power compensation device, and in the case of certain capacity, voltage fluctuation can be reduced by optimizing control parameters.

Key words: special power supply load; dynamic reactive power compensation device; voltage stability; voltage fluctuation; PSD-BPA

0 引言

相比较电网工程中常规负荷,采矿、冶金、电气化铁路、风光新能源等特殊负荷具有的非线性、波动性、冲击性等特点,将引起公共电网的电压波动及闪变、谐波、功率因数、三相不平衡等电能质量问题,且在某些薄弱电网会被放大。

为减小特殊负荷对电网及设备的不利影响,常规固定投切电容(抗)器在响应速度、补偿精度及使用寿命上并不能满足要求,以SVC、SVG为代表的动态无功补偿装置是解决上述电能质量问题的第一选择。由于这类工程相对较少,工程设计人员对其基本原理、仿真及设计尚有不足,使得动态无功补偿

装置效用不能充分发挥、主要问题得不到解决的现象时有发生。

基于此,对动态无功补偿装置配置方案(容量及型式)、仿真模型等进行了探讨和总结,对特殊供电负荷的动态无功补偿装置设计具有一定参考意义。

1 特殊负荷^[1]与动态无功补偿装置应用概况

1) 高压电动机: 高压电动机启动引起电网电压波动问题在电网薄弱地区采矿业较为常见,主要原因是电网短路容量小,电动机启动无功冲击相对大。该类电动机以传统驱动方式的6 kV或10 kV供电交流电动机为主,直接启动时启动电流倍数为7~8倍,采用Y-Δ变换、电阻分压等间接启动方式后,

启动电流倍数一般在2~3倍。另一类为采用交-直-交变频控制的大型交流(同步、异步)电动机,由于电动机电流可控,不存在冲击问题。工程应用上SVC或SVG都有采用。

2) 冶金负荷: 炉变短网是典型的低电压大电流系统(100~200V, 电流可上万安培), 生产过程中电极(通过电弧或炉料)存在频繁短路和断路, 进而引起电压波动及闪变、负序电流及三相不平衡、谐波、功率因数等系列电能质量问题, 矿热炉、电弧炉熔化期最为明显。负荷特点是无功冲击大(1.2~1.5倍炉变容量)、电压波动大、冲击无规律引起电网电压闪变严重。SVC、SVG在功能上均能满足抑制电压波动及闪变、补偿负序电流治理三相电压不平衡等, 实际应用中绝大多数采用SVC来抑制电压波动及闪变^[2]。

3) 电气化铁路: 电气化铁路为单相交流(27.5kV或55kV)负荷。一般而言, 由于用电负荷(10~50MW)相对接入点短路容量(牵引变电站多为110kV或220kV变电站)较小, 变化相对较慢(如供电长度30km, 车速200km/h)。为减小不平衡, 一般采用斯考特变压器、阻抗平衡变压器等。因机车主流驱动系统为交-直-交驱动方式, 电气化铁路系统谐波、功率因数可控, 实际工程中一般电气化铁路牵引电站不需要配置动态无功补偿装置; 另一类为地铁供电负荷, 牵引电站位于城区采用高压电缆供电, 轻载时供电系统存在充电功率过剩问题。绝大部分为直流制式, 即有三相交流-直流变换, 不存在三相不平衡问题。只有极少部分采用了交流制式, 有一定的三相不平衡问题, 但不突出。考虑到场地布置等因素, 一般采用SVG控制电压。

4) 风电、光伏等新能源为减小出力不稳引起的并网点电压波动均装设了动态无功补偿装置。早期装有MCR, 后期有TCR型SVC, 近年来由于新能源装机的低电压穿越要求, 全部采用SVG。

2 动态无功补偿装置型式及特点

特殊负荷站的无功补偿配置, 对于恒定负荷部分宜配置常规电容(抗)器。对于动态变化部分应配置适量动态无功补偿装置。目前常见的动态无功补偿有SVC和SVG, 其中SVC有TSC型、MCR型、TCR型或其组合型式^[3], 它们的工作原理、特性都有一定差别, 各有其适用场合。

动态无功补偿装置常见类型及拓扑如图1所示。

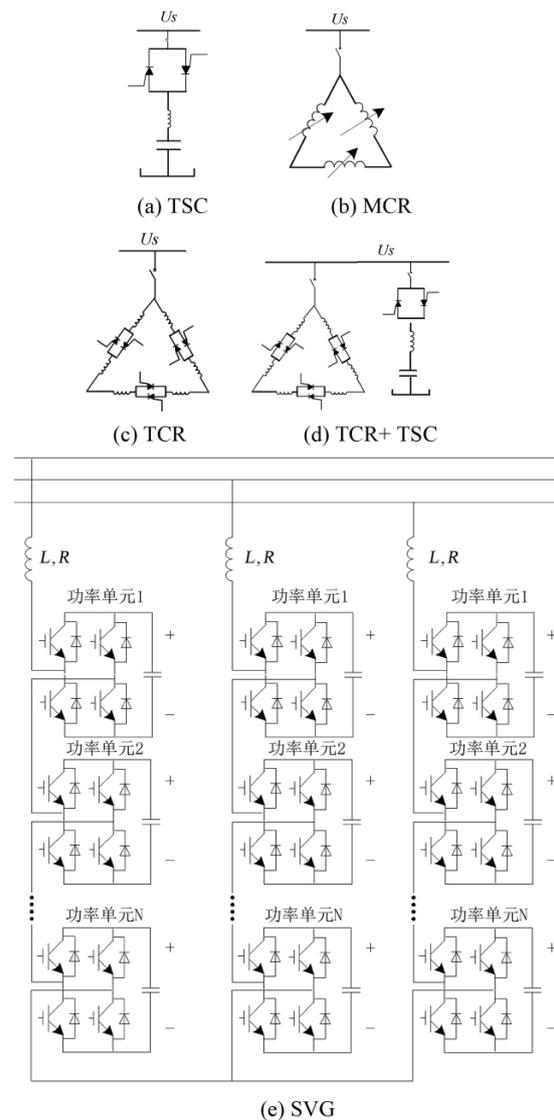


图1 动态无功补偿装置常见类型

TSC型SVC是对常规电容器组的改进, 将真空开关用2个反并联晶闸管替换, 可以在正、负半波分别触发导通, 装置优点是响应速度快、能够实现过零投切, 装置可靠、寿命长; 缺点是阶梯状补偿存在过补或欠补, 晶闸管使用数量多, 成本高、占地面积大。该型SVC应用较少, 有用于提高电网电压稳定性的案例。

TCR型SVC能够快速连续输出无功, TCR工作产生谐波, 需配置滤波支路。适用于需要容性出力较大、变化快速的场合, 如冶金行业。因感性出力时装置能损较大, 有的大型试验站存在无功过剩问题, 该种型式SVC并不适合。

TCR+TSC型SVC实际上是对TCR型SVC的改进, TSC可根据需要选择性投切电容器, TCR保留最小容量的必要滤波支路, 有利于在较小容性出力或感性出力时减小TCR出力, 适合于一些利用小时

数不高,但要求快速响应的试验性负荷。

MCR型SVC是通过改变铁芯饱和程度来调节感性无功变化,造价低,适用于110kV及以上高电压等级;装置响应速度慢(200ms),需配置谐波支路;有噪音问题。

SVG由全开断器件IGBT串并联而成,采用PWM调制技术、双闭环控制策略,无功电流能够快速变化,具有恒流源特性,相比SVC(阻抗特性)运行范围更宽^[4]。SVG输出无功电流与电压无关,更适合新能源并网的低电压穿越要求,目前得到广泛运用。装置为模块化结构,占地小,维护便利。

3 动态无功补偿装置控制系统模型

3.1 SVC控制模型

BPA仿真软件中SVC控制模型^[5]如图2所示。该模型由测量环节、电压调节器、触发环节等构成,共有间接和连续控制两种模式。当电压偏差 V_{ERR} 大于门槛值DV时,表明电压跌落较大,需要SVC快速输出较大容性无功支撑电压恢复,此时间接控制起作用,期望的电纳控制信号 B'_R 可设定为最大导纳值 B_{MAX} ;当电压逐渐恢复至门槛值以下($V_{ERR} < DV$)时,SVC进入连续控制模式,此时SVC在电压调节器的作用下对电压进行闭环控制。

间接控制模式适用于近区电网故障引起的大幅电压跌落工况,也即SVC无功储备快速释放;连续控制模式适用于电压小范围内调整,一个重要参数是连续控制增益 K_{SVC} ^[6],该值为

$$K_{SVC} = S_{MIN} / Q_{SVC} \quad (1)$$

式中: K_{SVC} 为连续控制增益; S_{MIN} 为被控点最小短路容量; Q_{SVC} 为SVC容量。

3.2 SVG控制模型

BPA仿真软件中SVG控制模型^[5,7-8]如图3所示。该模型由测量环节、电压调节器、延迟触发环节等构成,包含斜率控制、电压闭环控制等。电压偏差信号经过PI调节器输出为逆变器交流侧电压,该值与SVG并网点电压的相对大小就决定了SVG注入电网的无功电流性质与大小。该模型适用于直挂型SVG。此外,BPA还介绍了一种不计及出口电抗器的控制模型,该模型适合于配专用升压变压器的SVG。

4 仿真分析

以雄村铜矿专用站接入西藏末端电网为例,对动态无功补偿方案进行对比分析。

雄村铜矿项目有功功率约为86.7MW。根据业主资料,将在矿区新建1座雄村铜矿110kV变电站来保

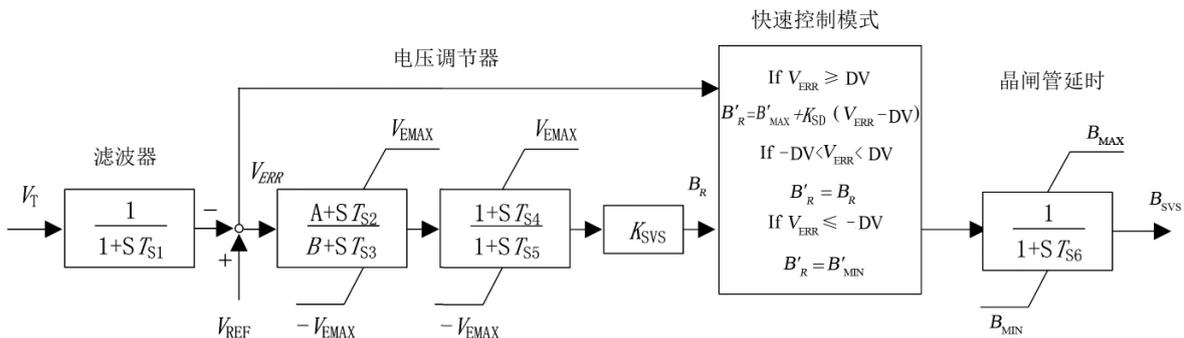


图2 SVC控制模型

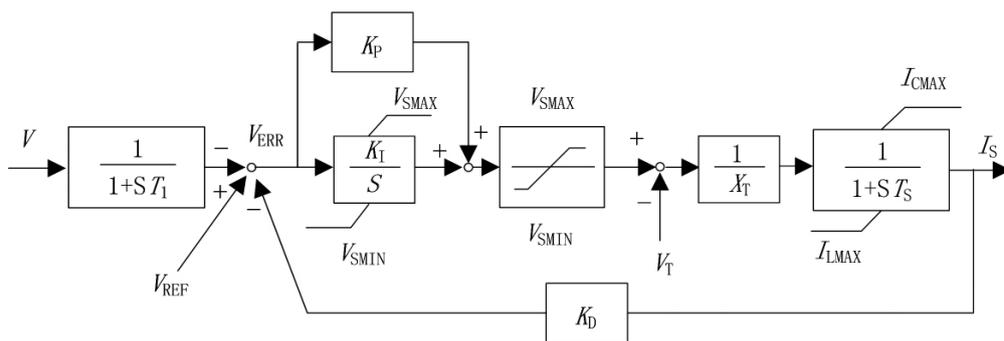


图3 SVG控制模型

证项目供电,主变压器容量 2×63 MVA,110 kV/10 kV。

雄村铜矿专用站的接入系统方案为:雄村铜矿110 kV变电站通过2回110 kV线路接入谢通门110 kV变电站,通过多林—谢通门—雄村线路供电。本期新建线路 2×25 km,导线截面 240 mm^2 。接入系统方案示意如图4所示。

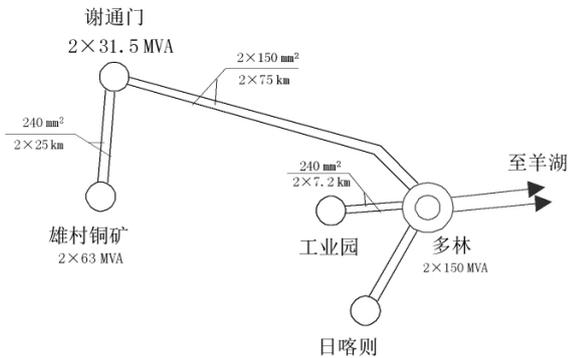


图4 接入系统方案

雄村铜矿110 kV用户站接入电网主要有两个问题^[9-10]:1)近区电网 $N-1$ 故障有电压稳定性问题;2)场区大型电动机起动引起电压波动较大(投产年枯小方式,用户站110 kV母线短路容量794 MVA,电动机起动瞬间无功冲击最大可达16.1 Mvar)。为解决上述问题,该站拟配置动态无功补偿装置。

配置动态无功补偿装置前后对电压稳定性的影响结果如表1所示,仿真结果表明:用户站未配置动态无功补偿装置时,在多林—谢通门1回110 kV线路发生三相短路 $N-1$ 故障,保护装置正确动作情况下,雄村铜矿110 kV变电站110 kV侧母线电压仅能恢复至0.55 pu,无法恢复至正常水平,电压失稳;当配置32 Mvar及以下的SVC时,电压仍失稳;配置34 Mvar的SVC时,电压仍稳定。配置20 Mvar及以下的SVG时,电压失稳;当配置26 Mvar的SVG时,电压稳定(恢复至与SVC基本相当的控制效果)。可见,由于具有快速调节无功能力,动态无功补偿装置能够提高系统电压稳定性,同时由于SVG的恒流源特性与SVC的阻抗特性差别,在达到相同效果情况下,SVG容量比SVC容量小23%左右。

表1 谢通门—多林 $N-1$ 时电压稳定结果

动态无功配置	故障位置	
	多林侧	谢通门侧
无	失稳	失稳
SVC 32 Mvar	失稳	稳定
SVC 34 Mvar	稳定	稳定
SVG 20 Mvar	失稳	稳定
SVG 22 Mvar	稳定	稳定
SVG 26 Mvar	稳定	稳定

当多林—谢通门1回110 kV线路多林侧发生 $N-1$ 故障,分别在用户站低压侧装设34 Mvar的SVC或26 Mvar的SVG以稳定用户站高压侧母线电压为目标的相关仿真波形如图5和图6所示。由图知:

1) SVC方案:0 s故障后,被控电压瞬间跌落至0.29 pu,电压偏差很大,在控制系统间接控制模式下,SVC直接输出最大导纳值0.34 pu以支撑电压恢复。当被控电压恢复至0.8 pu(DV取0.2)时,在控制系统连续控制模式下,调节电压恢复至故障前电压值。

2) SVG方案:0 s故障后,被控电压瞬间跌落至0.29 pu,在控制系统作用下,SVG通过连续动态调节无功电流,来控制用户站高压侧母线电压。

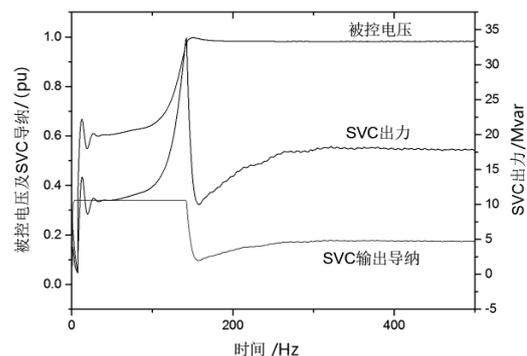


图5 SVC仿真波形

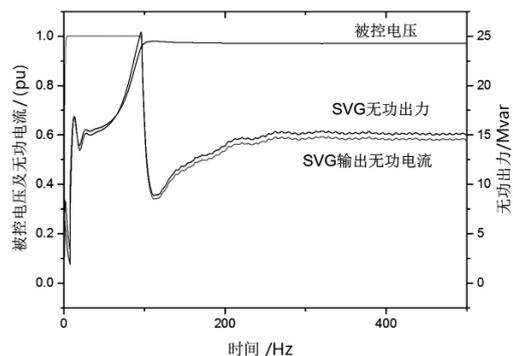


图6 SVG仿真波形

综上所述,为保证电压稳定性,SVC或者SVG应具备足够容量。在此前提下,通过优化调整SVC或SVG的控制参数,还可以满足正常运行时大型电机起动引起的电压波动问题。如对于雄村—谢通门、谢通门—多林各退出1回110 kV线路的运行工况,在未配置SVC或SVG情况下,单台电机起动引起用户站110 kV、10 kV侧电压波动达到8.86%、10.83%;若按上述容量及合适参数配置SVC或SVG,则可将用户站110 kV、10 kV侧电压波动值限制在2.5%以内^[11]。

(下转第74页)

4 结 语

鉴于对雅中换流站大件运输道路小关沟段滑塌分析及整治措施的研究,得出如下结论:

1) H2 滑坡为影响雅中换流站大件运输的主要滑坡,目前该滑坡已进一步向下塌方且与山体间形成较明显裂缝,在雨季前急需对其进行临时整治,以满足大件运输需求;

2) 对比各设计方案在滑坡体处治效果、施工周期等方面的优缺点,考虑到整治施工周期较短的客观情况,建议采用“钢管桩+挡墙”的临时整治方案;

3) 在滑坡临时整治施工期间,应加强对整个山体坡面稳定性的监测,适当布置自动或人工监测,根据山体坡面情况动态调整施工组织方案;

4) 施工单位应严格遵守既定的施工顺序,并应严格贯彻国家和地方政府关于环境保护方面的方针、政策及有关规章制度,加强环境保护,最大限度减少施工给自然环境带来的负面影响。

参考文献

[1] 陈汉雄. 水风互补四川清洁能源外送优化[J]. 中国电力, 2017, 50(9): 37-43.

[2] 陈汉雄. 四川电力发展对新能源建设规模影响分析[J]. 四川电力技术, 2018, 41(2): 46-50.
[3] 陈耀标. 浙江省特高压电力大件运输条件和运输方式研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
[4] 霍树军. 电网企业大件运输方案评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
[5] 秦海潮. 某高速公路高边坡滑坡分析及处治措施研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
[6] 李桂贤. 高填方边坡的稳定性分析与治理措施研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
[7] 渠风英. 边坡加固方法浅析[J]. 山西建筑, 2011, 37(22): 72-73.
[8] 文华. 边坡加固方案的优化设计[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2004.

作者简介:

黄建平(1977), 硕士, 高级工程师, 现从事电力检修和特高压工程建设工作;

朱 军(1985), 博士, 高级工程师, 主要研究方向为高压线路电磁特性及运维技术, 现从事特高压工程建设工作;

任 泽(1987), 硕士, 工程师, 现从事特高压工程建设工作。

(收稿日期: 2020-04-28)

(上接第 27 页)

5 结 语

对常见特殊供电负荷引起的主要电能质量问题及无功补偿装置应用情况进行了梳理,总结了动态无功补偿装置的基本原理、装置特点,有助于针对特殊负荷选择合适的动态无功补偿装置型式;详细介绍了 PSD-BPA 仿真软件中关于 SVC、SVG 的仿真应用,通过对薄弱电网某工程案例的仿真分析,验证了电压稳定性主要与动态无功补偿装置容量有关,在容量一定的情况下,可以通过优化控制参数来减小电压波动。

参考文献

[1] 付永生, 魏孟刚. 不同工业负荷的电能质量特点[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(4): 11-18.
[2] 中华人民共和国机械工业部. 电热设备电力装置设计规范: GB 50056-93[S]. 重庆: 重庆出版社, 1994.
[3] 陈延镖. 钢铁企业电力设计手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 458-538.
[4] 马莹. 基于静止同步无功补偿装置的电网电压控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
[5] 汤涌, 卜广全, 侯俊贤. PSD-ST 暂态稳定程序用户手册(5.0 版)[M]. 北京: 中国电力科学研究院系统所, 2015: 277-283.

[6] 李兰芳. 输电系统 SVC 电压调节器增益自适应控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 61-66.
[7] Modeling of Power Electronics Equipment (FACTS) in Load Flow and Stability Programs [R]. CIGRE TF 38-01-08, 1998.
[8] 王皓怀, 汤涌, 卜广全, 等. STATCOM 数学模型的建立及其应用研究[C]. 中国电机工程学会年会论文集, 西安, 2008.
[9] 郭明阳. 谢通门县维村铜矿专用变电站接入系统方案[R]. 成都: 四川电力设计咨询有限责任公司, 2016.
[10] 陈湘, 李媛媛, 宋云亭. 西藏地区大中型矿业负荷特性对联网通道稳定性的影响研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2016.
[11] 左龙. 动态无功补偿装置在特殊供电负荷中的应用研究[R]. 成都: 四川电力设计咨询有限责任公司, 2018.

作者简介:

左 龙(1986), 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统规划与设计、电能质量分析与评估;

吴晓蓉(1981), 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划与设计、电网安全稳定分析与评估;

林 波(1988), 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统规划与设计、大电网安全稳定分析;

郭明阳(1986), 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划与设计。

(收稿日期: 2020-05-26)