

SVC 抑制配电系统电压跌落的研究

刘东升, 张尧, 夏成军, 钟庆

(华南理工大学, 广东 广州 510640)

摘要: 随着各种敏感设备在工业中的广泛应用, 电能质量尤其是电压跌落问题越来越引起人们关注。静止型无功补偿器 SVC 具有快速平滑的调节无功输出的特点, 能够很好地对电压跌落进行抑制。从理论上分析了 SVC 能有效地抑制电压跌落的原理, 推导了 SVC 补偿容量的计算方法, 并且根据实际情况建立了 SVC 改善电压质量的电磁暂态仿真模型, 针对用户端不同的电压跌落深度, SVC 的不同安装地点进行 SVC 补偿的仿真, 对仿真结果进行对比分析。

关键词: 电压跌落; SVC; 配电系统

Research on mitigation of voltage sags in distribution system based on SVC

LIU Dong-sheng, ZHANG Yao, XIA Cheng-jun, ZHONG Qing

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Along with the wide application of sensitive equipment in industry, people are more and more concerned about power quality, especially voltage sags. Static Var Compensation, which has the characteristic of correcting reactive power fast and smoothly, can mitigate voltage sags well. This paper analyzes the reason why SVC can correct voltage sags effectively in theory, calculates the capability of SVC, and meanwhile builds up the electromagnetic transient model of compensating SVC which means to improve voltage quality based on the actual case. By simulation, it calculates the compensating capability of SVC due to different voltage sags and fixed locus, the results are compared.

Key words: voltage sags; SVC; distribution system

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)16-0037-05

0 引言

现代工业中随着大量敏感设备的投入运行, 电能质量尤其是电压的瞬间跌落问题尤其值得注意。电压的瞬间跌落会导致敏感设备运行不正常, 产品的报废甚至机器的停机, 给企业带来巨大的经济损失。因此, 如何抑制配电系统的电压跌落, 尽量减少对敏感用户的干扰, 已经成为目前必须关注的问题^[1,2]。

近年来发展起来的静止型无功补偿装置 SVC(Static Var Compensation)是一种快速调节无功功率的装置, 其具有响应速度快, 能够连续的进行无功补偿的特点, 对电压的瞬间跌落能有效地进行抑制^[3,4]。

本文提出利用 SVC 来抑制配电系统电压跌落, 并通过理论分析和仿真证明了 SVC 在解决电压跌落问题的有效性。

1 SVC 简介

SVC 主要是由交流调压电路构成一个晶闸管可控电抗器 TCR (Thyristor Controlled Reactor)。通过改变可控硅的触发角, 调节电抗器的导通时间, 从而达到改变等效电抗值的作用, 可以连续无极地调节输出的无功功率^[5~7]。SVC 基本配置有以下几种情况: TCR+固定电容器(FC), TCR+机械投切电容器(MSC), TCR+晶闸管投切电容器(TSC)等几种。SVC 主要由变压器、电抗器、电容器组、硅阀构成, 通过电抗器和电容器的组合, 产生可控的容性或感性无功, 其电压电流特性如图 1 所示。

SVC 的可控部分(TCR)由可控硅阀和空心线性电抗器组成。可控硅的触发角在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 范围内

基金项目: 华南理工大学自然科学基金资助项目 (B05E5060710)

变化,使 TCR 的无功功率 Q 从 100% 变化到 0。TCR 触发角和导通角之间的关系如式 (1) 所示。

$$\alpha + \sigma / 2 = \pi \quad (1)$$

式中: σ 为可控硅导通角; α 为可控硅触发角。

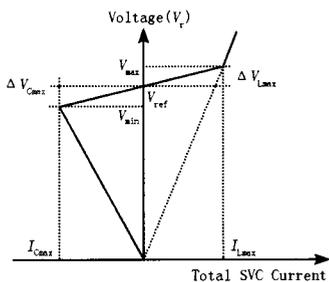


图 1 SVC 特性

Fig.1 Characteristic of SVC

TCR 基波电流有效值为:

$$I_{L1} = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_1} U \quad (2)$$

式中: U 为系统基波电压; X_1 为电抗器电抗值。

2 SVC 抑制电压跌落的基本原理

输配电系统发生短路故障、感应电动机的启动、雷击、开关操作、变压器和电容器组的投切等事件,都会引起电压的瞬间跌落现象,而一般线路接地短路故障为系统电压跌落的最主要原因。

无论是系统的短路故障还是负荷端无功的变化都会导致负荷端节点的无功功率的缺额,而无功与电压密切相关,无功的变化必然导致电压的变化。SVC 可看作为可控的可以平滑输出无功的装置,针对系统无功的变化迅速作出反应。公式 (3) 给出负荷端电压的变化值。

$$\Delta v = (\Delta Q_L \cdot X_S + \Delta P_L \cdot R_S) / V \quad (3)$$

其中: ΔQ_L 为负荷的无功变化值; ΔP_L 为负荷的有功变化值; X_S 为系统电抗; R_S 为系统电阻; V 为系统电压; Δv 为系统电压与负荷端电压的差值。

由公式 (3) 可知,负荷端电压的变化是由于输电线和变压器存在阻抗。在实际系统中, $R_S \ll X_S$, 所以负荷端电压变化值为

$$\Delta v \approx \frac{\Delta Q_L \cdot X_S}{V} \quad (4)$$

应用 SVC 无功输出的快速反应能力对无功实施动态的补偿,使 $\Delta Q_L = 0$, 在很大程度上能改善电压的跌落现象。系统的对地故障又可分为输电网故障和配电网故障,一般来说,输电网的电抗 X_S 远远

小于配电网的电抗,由公式 (4) 可知,如果在配网负荷端进行加装 SVC 补偿的话,输电网故障引起的电压跌落比配电网引起跌落需要补偿的无功要大很多,而且其效果也相当有限,治理难度大很多^[9]。

3 SVC 抑制电压跌落补偿容量的确定

SVC 补偿的简单示意图如图 2。系统采用戴维南等效,负荷采用恒功率负荷^[10~12]。

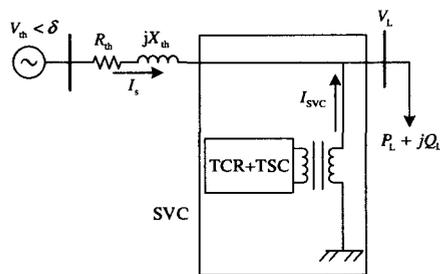


图 2 SVC 示意图

Fig.2 Schematic diagram of SVC

SVC 的补偿容量可由 $S_{SVC} = V_L \cdot I_{SVC}^*$ 来确定,故 SVC 的注入电流可由 SVC 的容量来确定。而 SVC 的注入电流由式 (5) 表示。

$$I_{SVC} = I_L - I_S = I_L - \frac{V_{th} - V_L}{Z_{th}} \quad (5)$$

即:

$$I_{SVC} \angle \eta = I_L \angle -\theta - \frac{V_{th}}{Z_{th}} \angle (\delta - \alpha) + \frac{V_L}{Z_{th}} \angle -\alpha \quad (6)$$

其中: I_{SVC} 为 SVC 的注入电流, η 为 SVC 注入电流的角度; I_L 为负荷端电流, V_L 为负荷端电压, θ 为负荷功率因数角; V_{th} 为等效电源电压, δ 为电源电压角; Z_{th} 为系统等效阻抗, α 为系统阻抗角。

由式 (6) 进一步推导出

$$P_{SVC} = P_L - \frac{V_{th} V_L}{Z_{th}} \cos(\delta - \alpha) + \frac{V_L^2}{Z_{th}} \cos \alpha \quad (7)$$

$$Q_{SVC} = Q_L + \frac{V_{th} V_L}{Z_{th}} \sin(\delta - \alpha) + \frac{V_L^2}{Z_{th}} \sin \alpha \quad (8)$$

一般情况下 SVC 输出有功 $P_{SVC} = 0$, 故由 (7) 可以得出

$$\delta = \alpha - \cos^{-1} \left(\frac{V_L}{V_{th}} \cos \alpha + \frac{Z_{th} P_L}{V_{th} V_L} \right) \quad (9)$$

将式 (9) 得出的 δ 代入 (8) 中即可得出 SVC 需要补偿的无功功率的大小。而在实际估算中,可以近似取 $V_L = 1.0$, 考虑到系统运行方式的变化,

线路等效阻抗 Z_h 也会相应发生变化,在估算时采用最大运行方式下的等效电抗计算,同时忽略掉线路阻抗 Z_h 的电阻部分, α 可近似取 90° [13]。

4 SVC 抑制配电系统电压跌落的仿真分析

图 3 给出一硬盘生产企业供电单线图,其中有五条 10 kV 的馈线对其进行供电。

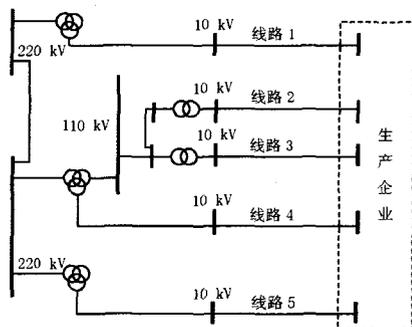


图 3 生产企业供电单线图

Fig.3 Single-track diagram of enterprise

电压的瞬间跌落给该企业带来巨大的经济损失。现拟加装 SVC 装置来抑制电压的瞬间跌落,然而对于不同电压跌落深度和不同的安装地点,需要 SVC 的容量也不同,因此其投资也将不同 [9]。根据实际供电单线图建立 PSCAD/EMTDC 仿真模型,就不同电压跌落深度, SVC 不同安装地点的容量进行仿真分析,图 4 给出 SVC 的仿真模型,其参数与实际电网参数一致。

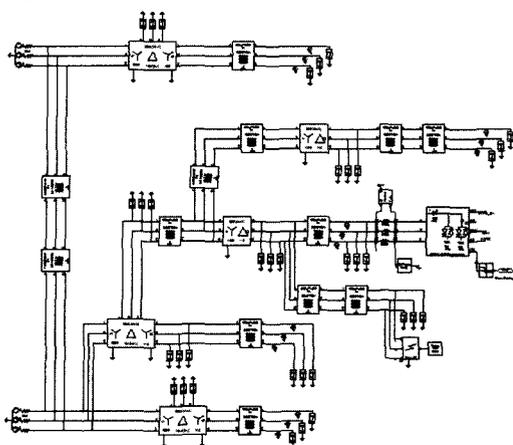


图 4 SVC 的 PSCAD 仿真模型

Fig.4 PSCAD model of SVC

仿真研究主要基于以下四点假设:

(1) 用户端电压跌落主要考虑线路接地短路故障引起的。

(2) 以 500 kV 变电站 220 kV 电压母线为恒定电压;

(3) 给用户供电的线路的负荷采用恒功率负荷模型等值;

(4) 每个变电站的 10 kV 母线上带的其余线路所带负载用 10 kV 母线上的负载等效。

首先,针对配电系统不同故障地点不同故障类型造成的不同的电压跌落深度进行 SVC 的补偿仿真,先大致估算出所需 SVC 容量大小再进行不断的仿真以确定不同的电压跌落深度所需要的无功补偿容量的大小,另外,针对 SVC 的不同安装地点进行仿真比较以确定最佳的安装容量和位置 [10,11]。

图 5 给出了线路 3 的相邻馈线发生短路故障后线路 3 负荷端的电压波形,其电压跌落幅度为 15% 左右。

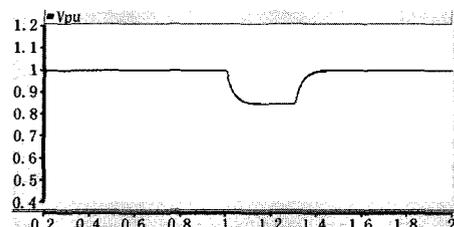


图 5 线路 3 末端电压波形

Fig.5 Diagram of voltage at the end of circuitry 3

在线路 3 末端负荷端加装 SVC 装置,仿真分析发现, SVC 补偿容量选取 12MVA 左右才能有效改善电压质量,有效地抑制电压跌落,图 6 给出加装 SVC 后的线路 3 末端电压波形。

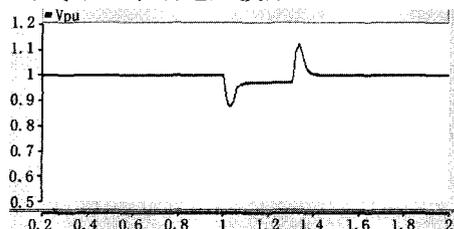


图 6 加装 SVC 后线路 3 末端电压波形

Fig.6 Diagram of voltage at the end of circuitry 3 with SVC

而如果 SVC 加装在变电站的 10 kV 母线处,则欲使线路 3 末端电压质量达到相同的改善效果,仿真表明 SVC 的容量大约需要 45 MVA,其所需容量为装设在负荷端的 4 倍左右,相应的装设在变电站低压母线处的投资也大很多。

图 7 给出了针对线路 3 用户端的不同电压跌落深度,在用户侧和变电站低压母线侧不同地点安装 SVC 所需的容量的大小的曲线关系。

仿真结果表明,在 10 kV 系统发生故障时,无论在用户侧还是变电站侧加装 SVC 装置都能够起到提升用户线路末端电压达到抑制电压跌落的作用。SVC 的响应速度快,可以在 20~30 ms 内有效

地提升电压进而保证电压质量在用户要求的范围内。要取得相同的电压补偿效果,安装于电网的变电站母线 SVC 的容量要远远大于安装在用户端,在相间故障情况(电压跌落约为 15%~25%),安装在变电站低压侧的容量约是安装在用户侧的 3~4 倍,在电压跌落深度较大的情况下,安装在变电站低压侧的容量将为安装在用户侧容量的 5~6 倍。

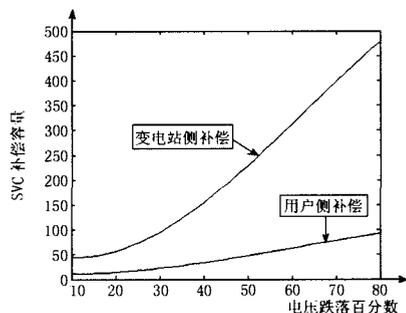


图 7 不同安装地点的 SVC 容量

Fig.7 Capability of SVC related to different locus

另外,对于 110 kV 以上输电网故障造成的用户端电压跌落情况进行 SVC 补偿仿真,仿真结果发现,输电网故障造成用户端电压跌落的幅度很大,而且在配电网用户端加 SVC 装置进行补偿很难对输电网故障造成的电压跌落现象进行有效的抑制,这就需要在输电系统加以解决。

5 结束语

本文从理论上分析了 SVC 能够有效抑制电压跌落的原理,并根据实际电网数据搭建 PSCAD 仿真模型进行仿真分析,得出以下结论:

(1) 当 10 kV 配电系统发生故障时, SVC 能有效地进行无功补偿进而抑制电压瞬间跌落。然而对于输电系统发生故障而引起的用户电压跌落时, SVC 所起的作用非常有限,基本上很难将跌落的电压补偿起来,这时就需要从输电网方面进行解决。

(2) SVC 对于电压跌落的响应时间很快,一般在 20~30 ms 以内可以将跌落的电压控制在用户可接受的合理的范围内。

(3) 伴随着用户端电压跌落程度的增加,所需要 SVC 的容量随之增加,而若要取得相同的电压补偿效果, SVC 安装于电网变电站低压母线处的容量要远远大于安装于用户侧的 SVC 容量,其投资也相应大很多。

因此,利用 SVC 可以有效地抑制配电网的电压瞬间跌落,而且 SVC 装设于用户侧的效果最好,其设备投资也最小。

然而,本文在 SVC 的补偿研究中也存在一定的不足,主要有两点:第一, SVC 会出现动态元件动作后短暂过电压情况,而在本文仿真研究中由于对本仿真结果没有太大影响,故忽略此方面。第二,对于 SVC 所产生的谐波问题由于对 SVC 的安装容量和位置也不会产生大的影响,所以在确定 SVC 容量时并没有对谐波进行详细的仿真计算。在今后的工作有待进一步研究改进,而且实际安装调试 SVC 的工程中,无论是 SVC 的暂态过电压问题还是谐波问题都是应该进行详细的分析考虑的问题。

参考文献

- [1] 王宾,潘贞存,徐丙垠. 配电系统电压跌落问题的分析[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 56-59.
WANG Bin, PAN Zhen-cun, XU Bing-yin. Analysis of Voltage Sags in Distribution System[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 56-59.
- [2] 金燕云,罗毅,涂光瑜. 配电系统电压跌落问题的研究[J]. 继电器, 2003, 31(10): 56-62.
JIN Yan-yun, LUO YI, TU Guang-yu. Study of Voltage Sags in Power Distribution System[J]. Relay, 2003, 31(10): 56-62.
- [3] 任丕德,刘发友,周胜军. 动态无功补偿技术的应用现状[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 81-83.
REN Pi-de, LIU Fa-you, ZHOU Sheng-jun. The Application State of Dynamic Var Compensation Technology[J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 81-83.
- [4] 刘玉雷,解大,张延迟. 静止无功补偿器用于抑制厂用电系统电压波动仿真[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 97-101.
LIU Yu-lei, JIE DA, ZHANG Yan-chi. Simulation of Static Var Compensator to Restrain the Fluctuation of Electric Auxiliary system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16): 97-101.
- [5] 苏建设,乔颖,陈陈. 含 SVC 的组合电力系统动态建模及稳定性分析方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(3): 13-16.
SUN Jian-she, QIAO YING, CHEN CHEN. Modeling and Stability Analysis of Composite Power Systems Installed with SVC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(3): 13-16.
- [6] 康忠键,陈学允. SVC 与发电机励磁的非线性状态 PI 协调控制[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 30-34.
KANG Zhong-jian, CHEN Xue-yun. Nonlinear State PI Control for Static Var Compensator (SVC) Cooperating

- with Excitation System of Generator[J]. Power System Technology, 2001,25(2):30-34.
- [7] 纪飞峰, 周荔丹, 姚钢, 等. 基于同步对称分量法的静止无功补偿装置[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 24-29.
JI Fei-feng, ZHOU Li-dan, YAO Gang, et al. Static Var Compensator Based on the Method of Synchronous Symmetrical Component[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6):24-29.
- [8] 艾欣, 蔡国伟, 穆钢, TSC 型静止无功补偿器提高系统阻尼特性的研究[J]. 电网技术, 1997, 21(1): 6-10.
AI Xin, CAI Guo-wei, MU Gang. Improve Damping Characteristic by Use of TSC[J]. Power System Technology, 1997, 21(1):6-10.
- [9] 袁佳歆, 陈柏超, 万黎, 等. 利用配电网静止无功补偿器改善配电网电能质量的方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 81-84.
YUAN Jia-xin, CHEN Bai-chao, WAN Li, et al. The Method to Improve Power Quality of Distribution System by Distribution Static Compensator[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 81-84.
- [10] Haque M H. Compensation of Distribution System Voltage Sags by DVR and D-STATCOM[M]. IEEE Porto Power Tech Conference, 2001.
- [11] Hammand A E. Analysis of Power System Stability Enhancement by Static Var Compensators[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1(4):222-227.
- [12] Reghunathan Thottappillil. Static Var Compensations For Critical Synchronous Motor Loads During Voltages Dips[J]. IEEE Trans on Power Systems, (9):1517-1523.
- [13] CHOI S S, STEWART J R, SINGH B, et al. Performance Testing of a Long Distance Radial Static VAR Compensated Transmission System and Validation of Simulation Results [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 3(4):1509-1513.
- [14] 吴杰. 大型电弧炼钢炉 SVC 方案设计及其实际效果[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 76-80.
WU Jie. Scheme Design and Its Practical Effect of SVC for a Large Scale Arc[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 76-80.
- [15] 翁利民, 张广祥, 曾莉. 武钢硅钢 SVC 的研制与补偿效果的评价[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(19): 39-43.
WENG Li-min, ZHANG Guang-xiang, ZENG Li. Research and Compensation Effect Analysis of SVC Device Used in Silicon Steel Production Line of Wuhan Iron and Steel Company[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(19):39-43.

收稿日期: 2007-01-22

作者简介:

刘东升(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行和控制; E-mail: linux853@sohu.com

张尧(1948-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统运行分析与控制、电压稳定性等方面的教学与科研工作;

夏成军(1974-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、HVDC 及 FACTS。

(上接第 36 页 continued from page 36)

- [8] 李滔. 基于流水线 CORDIC 算法的三角函数发生器[J]. 系统工程电子技术, 2000, 22(4):85-88.
LI Tao Trigonometric Function Generator Based on Pipelined CORDIC[J]. System Engineering an Electronics, 2000, 22(4):85-88.

作者简介:

黄聚永(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能仪表、信号处理、计算机测控、传感器应用; E-mail: hhjyy2008@126.com

袁慧梅(1971-), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为智能仪表。

收稿日期: 2007-01-21; 修回日期: 2007-04-02