

静止补偿器在电力系统中的应用

黄建新 洪佩孙

TM 712

(河海大学电力工程系 南京 210098)

摘要 本文综述静止补偿器在无功功率补偿和管理, 调压、过电压、低电压管理, 改善电力系统稳定性能以及抑制系统功率振荡方面的应用, 并介绍一种较为实用的混合型静止补偿器。文末对近年来出现的一种可关断可控硅管的新型静止补偿器作了概略介绍。

关键词 电力系统 静止补偿器 稳定性 无功功率 调压

目前, 使用较为广泛的静止无功补偿器(SVC)由固定的电容器和可控硅控制的电抗器组成(FC-TCR), 或由可控硅投切电容器和可控硅控制的电抗器组成(TSC-TCR)。这种可控硅控制的静止无功补偿器具有响应速度快、使用寿命长的特点, 其基本结构如图1所示。只要适当地控制切投开关, 就可以在某一特定电压下, 连续地改变无功功率的输出值, 使其在最大的容性和最大的感性输出之间变化。

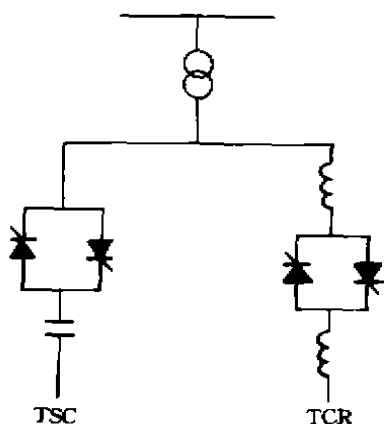


图1 TSC-TCR型静止无功补偿器

可控硅控制的静止补偿器在电力系统中获得了广泛的应用。其主要作用^[1-5]包括:

- a. 无功功率补偿和管理。
- b. 调压和动态过电压、低压管理。

c. 提高系统的稳定运行极限, 从而提高系统的输电能力。

d. 提供系统阻尼, 抑制功率振荡。

1 静止补偿器对系统稳定性的改善

电力系统的稳定可以从暂态稳定和动态稳定两个方面进行考察, SVC能够较为有效地改变电力系统的暂态和动态稳定性^[1,2,4]。

1.1 暂态稳定

图2示出了发电机通过传输线接到无穷大母线的简单模型, 其传输功率为

$$P = \frac{V^2}{X} \sin \delta \quad (1)$$

最大的传输功率, 即静态稳定极限为

$$P_{\max} = \frac{V^2}{X} \quad (\delta = \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

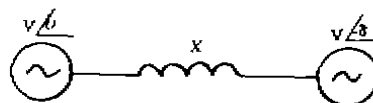


图2 简单的两机电力系统

如果在传输线的中点加装 SVC(见图3), 使 $V_m = V_m - (\angle - \delta/2)$, 那么其传输功率可表示为

$$P = \frac{2VV_M}{X} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (3)$$

其最大传输功率为

$$P_{\max} = \frac{2VV_M}{X} \quad (\delta = \pi) \quad (4)$$

可见, SVC 极大地提高了系统的静稳定极限, 增加了系统的功率传输能力, 从而有效地改善了系统的暂态稳定。

1.2 动态稳定

仍然考虑图 3 所示的具有中点补偿器的简单电力系统。系统的摇摆方程为

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P \quad (5)$$

式中 P_m 为加在发电机上的机械功率; P 为发电机的传输功率; $(P - P_m)$ 为加速功率。

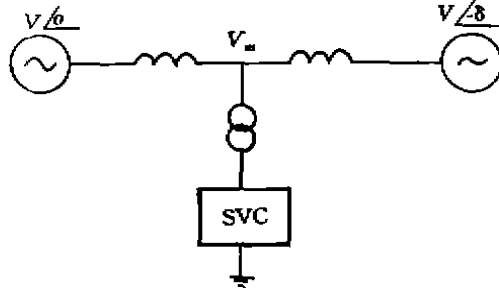


图3 具有中点补偿的简单两机电力系统

在小扰动和恒定机械功率的前提下, 式(5)变为

$$\frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = -\frac{\Delta P}{M} \quad (6)$$

而由方程(3), 得

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial P}{\partial V_M} \Delta V_M + \frac{\partial P}{\partial \delta} \Delta \delta \quad (7)$$

若 $V_M = \text{常数}$, 则式(6)变为

$$\frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \frac{K_S}{M} \Delta \delta = 0 \quad (8)$$

式中

$$K_S = \frac{\partial P}{\partial \delta} \quad (9)$$

相应的特征方程为

$$S^2 + \frac{K_S}{M} = 0 \quad (10)$$

其解为

$$S_{1,2} = \pm \sqrt{-\frac{K_S}{M}} \quad (11)$$

若 $K_S > 0$, 则

$$S_{1,2} = \pm j \sqrt{\frac{K_S}{M}} \quad (12)$$

系统是等幅振荡的, 振荡频率为

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_S}{M}} \quad (13)$$

若 $K_S < 0$, 方程具有正实根, 系统是不稳定的, 因此中点电压恒定的静态补偿不能对系统的振荡提供阻尼。

设想系统的中点电压是 $\frac{d\Delta \delta}{dt}$ 的函数, 即

$$\Delta V_M = K \frac{d\Delta \delta}{dt} \quad (14)$$

其中 K 是常数, 则方程(7)变为

$$\frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \frac{K}{M} \cdot \frac{\partial P}{\partial V_M} \cdot \frac{d\Delta \delta}{dt} + \frac{K_S}{M} \Delta \delta = 0 \quad (15)$$

该式的特征方程为

$$S^2 + 2\xi\omega_0 S + \omega_0^2 = 0 \quad (16)$$

式中

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_S}{M}} \quad (17)$$

$$\xi = \frac{K}{2\sqrt{K_S M}} \cdot \frac{\partial P}{\partial V_M} \quad (18)$$

由此可见, 系统具有正阻尼, 功角 δ 呈衰减振荡。 $\frac{d\Delta \delta}{dt}$ 不易直接由测量得到, 因此必须采用较易测量的物理量(如系统频率, 传输功率等), 作为端电压的控制信号。由式(6)可知

$$\frac{d\Delta \delta}{dt} \propto \int \Delta P dt \quad (19)$$

所以节点电压可由系统潮流来控制。又因为

$$\frac{d\Delta \delta}{dt} \propto f$$

所以端电压的大小也可由系统频率来决定。当系统频率增加时, 端电压升高, 从而增加传

输功率以抑制发电机的加速;当系统频率降低时,端电压降低,从而降低传输功率以抑制发电机减速,由此为系统提供正阻尼,抑制功率振荡。

2 无功储备控制

SVC在调压、抑制功率振荡、提高电力系统的稳定性方面有着极为广泛的应用。然而,如果系统的无功都由 SVC 提供,显然所需 SVC 的容量很大,费用也很高,因而限制了 SVC 的应用。为此,可采用混合型 SVC 来解决这个问题。即由 SVC 和机械式投切电容器或电抗器联合组成静止无功系统,以降低 SVC 的额定容量。

无功储备控制的目的是把稳态时静止无功补偿器的输出限制在参考值,以保证系统有足够的备用容量,便于处理动态扰动,而无需扩大 SVC 的额定容量。

当系统出现暂态扰动时,利用 TSC-TCR 型无功补偿器快速响应的特点,迅速改变其输出,以抑制暂态扰动,当扰动使系统运行到一个新的运行点时,无功储备控制有效地改变电压参考值,而让其它慢速的无功补偿设备(如机械式投切电容)逐渐承担稳态无功负荷。图 4 示出了一种由 TSC-TCR 和机械式投切电容(MSC)组成的静止补偿系统。该系统工作于无功储备运行方式,其结构简图

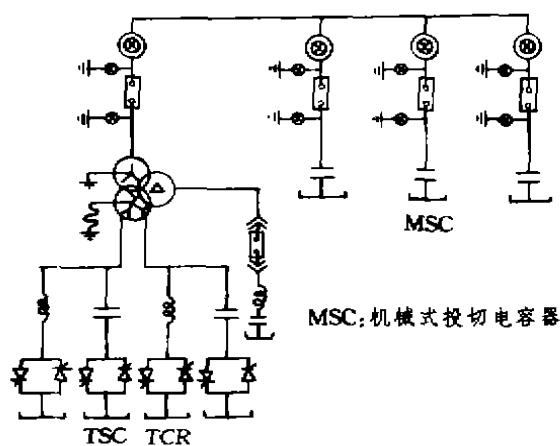


图 4 静止补偿系统

如图 5 所示。该运行方式的静止补偿器的输入信号的获取和常压调节方式不同,后者通过节点电压和固定参考电压比较而获得(见图 6),而前者由节点电压信号通过复位滤波器(reset filter)获得(相当于图 6 参考电压可变的情况)。

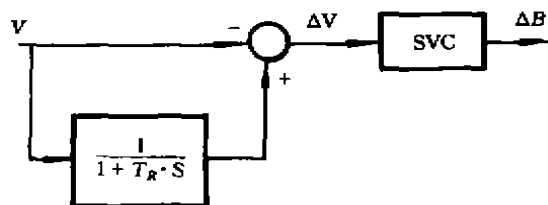


图 5 无功储备控制方式

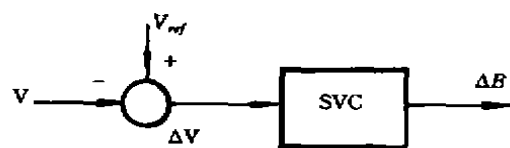


图 6 常压控制运行方式

在节点电压突变时,如节点电压原值为参考电压 V_{ref} ,则图 5 和图 6 的 ΔV 是基本相同的。这是因为图 5 中的一阶惯性环节 $1/(1+T_R S)$ 的输出电压不能突变,所以在起始阶段,两者控制方式的控制规律是相近的,都起到了较好的抑制振荡、稳定节点电压的作用。然而,对于图 5 所示的无功储备控制方式,当运行于稳态时, $\Delta V = 0$, SVC 将不输出任何无功,缺损无功由机械式投切电容逐渐承担,这样保证了 SVC 有足够的备用容量,以应付新的暂态扰动。

图 7 示出了 TSC-TCR 型 SVC 无功输出

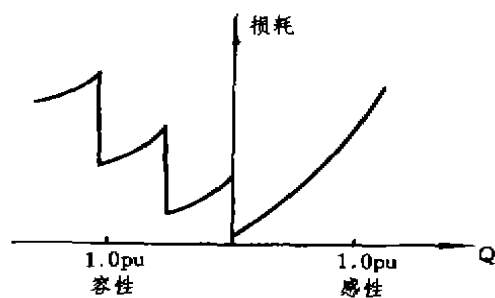


图 7 TSC-TCR 型 SVC 的损耗

和损耗之间的关系曲线。由于采用无功储备控制方式, SVC 稳态时没有无功输出, 由图可见, 此时损耗最小。而机械式投切电容的功耗很小, 所以无功储备运行方式还能起到降低系统功耗的作用。

3 展 望

近年来, 出现了一种可关断可控硅管 (GTO) 的新型静止无功补偿器^[6-8], 又称先进静止无功电源 (ASVG)。ASVG 与 FC-TCR, TSC-TCR, 混合型 SVC 相比有如下特点:

a. 省去了大容量的电感和电容, 同样的无功调节容量, 前者所需的电容器容量比后者约小一个数量级。

b. 两者所发感性和容性无功均能在其出力范围内连续调节。

c. ASVG 只能在三相基本平衡的电力系统中运行, 同时, GTO 器件在作容性负荷运行时关断较困难。

d. 后者不仅能在三相平衡的系统中运行, 也可在三相不平衡系统中运行。

一般电力系统三相基本对称, 且 ASVG 投资较小, 因此, ASVG 有着较好的发展前景。然而, FC-TCR, TSC-TCR, 混合型 SVC 能在三相不平衡系统中良好地运行, 且具有

快速响应的特性, 故也必将在电力系统中得到越来越广泛的应用。

参考文献

- 1 Suzuki H. Effective application of static var compensators to damp oscillations. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, PAS-104 (6):1405~1410
 - 2 侯博渊. 变电站无功设备的运行与控制. 北京: 水利电力出版社, 1989. 52~69
 - 3 Lefebvre S, Gerin-Lajoie L. A static compensators model for the empt. Transactions on Power System, 1992, 7(2):477~483
 - 4 米勒 T J E. 电力系统无功功率控制. 胡国根等译. 北京: 水利电力出版社, 1990. 59~151
 - 5 Pai M A et al. Transient stability analysis of multi-machine AC/DC power system via energy method. IEEE Trans, 1981, PAS-100(2):5627~5635
 - 6 Lerch E et al. Advanced SVC control for damping system oscillation. IEEE Trans on PS, 1991, 6 (2):524~535
 - 7 Padlyar K R, Varma R K. Damping torque analysis of static var system controllers. IEEE Tran on PS, 1991, 6(2):458~465
 - 8 张中华, 倪以信等. ASVG 的理论分析与仿真研究. 见: 中国电机工程学会电力系统专业委员会等主编. 电力系统分析与控制学术年会论文集. 北京: 电力科学研究院出版科, 1992. 328~334
- (收稿日期: 1995-07-06)

(上接第 21 页)

点越来越受到过程控制工程师的欢迎。随着电力工业的发展和变频器性能价格比的提高, 电力生产过程控制中大功率流体机械采用变频调速是必然趋势, 这对提高电力生产过程控制的自动化水平和节约能源, 将起到不可估量的作用。

参考文献

- 1 华能电力公司. 变频器在锅炉控制系统中的应

- 用. 北京节能, 1994(4):20~22
- 2 童楚生. 工业变频自动控制系统的工程应用. 节能, 1995(5):15~18
- 3 周丕钧等. 变频调速控制器与节能. 节能, 1995 (5):23~25
- 4 程鹏, 刘建芬. 风机、泵类调速控制与节能. 能源研究与利用, 1995(6):7~10
- 5 (日)胜家, 正广等. 变速蓄能发电系统的开发研究. 东芝评论, 1987(11):26~29

(收稿日期: 1995-12-25)