SVC 对电力系统频率稳定性影响的仿真分析

吴 起,林 莉,牟道槐,陈 进

(重庆大学 高电压与电工新技术教育部重点实验室,重庆 400044)

摘要:用 Matlab 软件建立电力系统仿真模型,负荷模型包括异步电动机模型和恒阻抗静态模型,静止无功补偿器(SVC)采用一阶线性化实用模型,对系统遭受双回线永久断一回线和系统负荷突然剧增这 2 种典型大干扰后 SVC 动作对系统频率造成的影响进行仿真和分析,包括 SVC 出力大小、动作时间及控制策略的影响。针对断一回线故障,当负荷端电动机比重较小时,SVC 可使频率稳定在额定值。对系统在不同调频能力下负荷剧增时所做的频率变化仿真表明,SVC 对系统的频率稳定性产生负面影响,SVC 无功出力越大,则频率质量越差,当系统调频能力较弱而 SVC 无功出力很大时,会加速系统的频率崩溃。因此,在 SVC 的控制系统中应引入频率反馈,当监测频率低于某一定值时,应减少 SVC 出力至合理值。

关键词:电力系统;静止无功补偿器;频率

中图分类号:TM 712 **文献标识码**:A **文章编号**:1006-6047(2007)05-0058-03

电压稳定和频率稳定是电力系统稳定的 2 个重要方面。为了提高系统的电压稳定性,除加强电网结构,采用合适的运行、调度手段外,越来越多的无功补偿装置应用于电力系统中,这些设备在维持系统电压水平、提高大干扰动态电压稳定性方面发挥了重要作用[1-3]。然而,在利用无功补偿设备提高电压稳定性时,如果仅仅以提高电压稳定性为目标,却造成频率质量的严重破坏,那么仍然可能发生电力系统崩溃[4]。

静止无功补偿器(SVC)作为较为成熟的 FACTS 装置,其丰富的运行经验、较好的性价比使得它在电力系统中获得广泛的应用,成为电力系统无功补偿的最重要设备之一。现针对 SVC 无功补偿,建立电力系统数学模型,利用 Matlab 仿真软件,分析 SVC 的调节对系统频率特性的影响[5-8]。

1 仿真系统数学模型

所采用的电力系统模型如图 1 所示。其中,负荷模型包括异步电动机模型和恒阻抗静态模型(功率随电压下降而降低的程度较大),下面就仿真方法及模型系统进行说明[9]。

Matlab 仿真中状态方程使用的模块是 Simulink 中的 state-space 模块,表达式为

$$\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u},\quad \boldsymbol{y}=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{D}\boldsymbol{u}$$

式中 $\boldsymbol{x}$ 是状态变量;$\boldsymbol{u}$ 是输入变量;$\boldsymbol{y}$ 是输出变量。

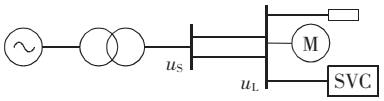

图 1 电力系统模型

Fig.1 The model of power system

收稿日期:2006-06-26;修回日期:2006-10-26

发电机的状态方程组用标么值表示为

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}\delta_G}{\mathrm{d}t}&=\omega_G-1\\ \frac{\mathrm{d}\omega_G}{\mathrm{d}t}&=\frac{1}{\tau_j}(P_m-P_e)\\ \frac{\mathrm{d}u_S}{\mathrm{d}t}&=\frac{-1}{\tau'_{d0}}u_S+\frac{1}{\tau'_{d0}}u_f\end{aligned}\tag{1}$$

式中 P_m 为机械功率;P_e 为电磁功率;u_S 为发电机端电压;u_f 为发电机励磁电压;τ'_{d0} 为发电机 d 轴开路暂态时间常数。

仿真中取 $\tau_j=4$,$\tau'_{d0}=2$,状态变量的初值取 $\delta_{G0}=0.0954$,$\Delta\omega_{G0}=0$,$u_S=1.05$。

电动机的状态方程为

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}\delta_L}{\mathrm{d}t}&=\omega_L-1\\ \frac{\mathrm{d}\omega_L}{\mathrm{d}t}&=\frac{1}{\tau_{jL}}(P_{eL}-P_{mL})\\ \frac{\mathrm{d}u_L}{\mathrm{d}t}&=\frac{-1}{\tau'_{Ld0}}u_L+\frac{1}{\tau'_{Ld0}}u_{L\infty}\end{aligned}\tag{2}$$

式中 P_{mL} 为与电动机同轴的工具机的有功功率。

仿真中取 $\tau_{jL}=3$,$\tau'_{Ld0}=1.5$,状态变量的初值取 $\delta_L=0$,$\Delta\omega_{L0}=0$,$u_L=1$。

SVC 采用一阶线性化实用模型,如图 2 所示[10]。图中,把 SVC 和调节器的时滞统一考虑成一个一阶惯性环节;α 是可调电感的触发角;U_B 是电压控制信号;Z 是其他控制输入信号,由具体情况而定;f^{-1}

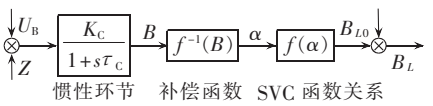

图 2 SVC 的实用模型

Fig.2 The practical model of SVC

是 f 的反函数，这里起线性化作用，线性化后的模型只包括输入、惯性环节和输出。其中，

$$f(\alpha)=B_{L\max}\frac{2\pi-2\alpha+\sin 2\alpha}{\pi} \tag{3}$$

式中　$B_{L\max}$ 为可调电感的最大电纳值。

则

$$\dot{B}_L=\frac{1}{\tau_C}[-B_L+B_{L0}+K_C(U_B+Z)] \tag{4}$$

$$B_{SVC}=B_L-B_C \tag{5}$$

仿真中，取 $B_{L\max}=3.0$，$B_C=5.0$，$K_C=40$，$\tau_C=0.1$ s。

综合负荷模型采用恒阻抗负荷与异步电动机负荷综合模型，恒阻抗负荷为 $P=(1-k)U^2$，其中 k 值代表综合负荷中动态负荷及异步电动机的比重。由于在电压水平降低时，电机需要从系统中吸收更多的无功功率，电机比例越高，对系统电压影响越大[11]。在本次仿真中，分别取 $k=0.3$ 及 $k=0.7$。

2　仿真结果及分析

设置 2 种典型的大干扰，分别是双回线永久断一回线和系统负荷突然剧增。

2.1　永久断一回线故障仿真

双回线路在 $t=1$ s 时发生一回断线故障。仿真的初始条件为：发电机的无功－电压调节系数为 3 %，原动机的有功－频率调节系数为 5 %，分析 SVC 的出力大小对系统频率所造成的影响，取 $k=0.3$。仿真结果如图 3～5 所示。

由图 3～5 可知，未装 SVC 时，系统稳定频率为 50.25 Hz；SVC 出力为 1 p.u.时，系统的稳定频率为 50 Hz。可见 SVC 的稳定作用抑制了系统频率上升。

当电动机的比重 $k=0.7$ 时，异步电动机的无功－电压动态特性提高了系统的临界电压，使系统的大干扰电压稳定性变得更为脆弱，通过仿真可知故障后最

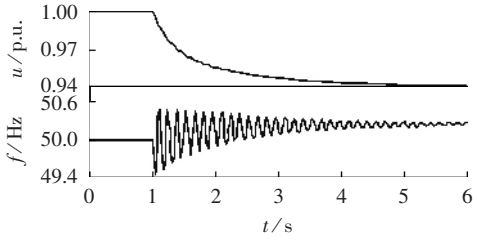

图 3　未安装 SVC 时的电压及频率变化

Fig.3 The variation of voltage and frequency without SVC

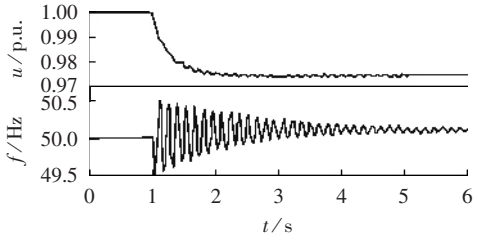

图 4　SVC 无功出力为 0.1 p.u.时的电压及频率变化

Fig.4 The variation of voltage and frequency when $Q_{SVC}=0.1$ p.u.

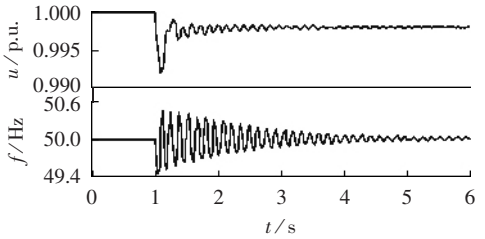

图 5　SVC 无功出力为 1 p.u.时的电压及频率变化

Fig.5 The variation of voltage and frequency when $Q_{SVC}=1$ p.u.

终导致电压和频率崩溃，但将 SVC 无功出力最大值提高至 1 p.u.时，最终使得电压稳定在 $u=0.998$ p.u.，$f=50$ Hz。

2.2　负荷剧增大干扰仿真[12]

取 $k=0.3$，系统的有功和无功功率均增至发电机原来所带功率的 2 倍，发电机的无功－电压调节系数为 3 %，原动机的有功－频率调节系数为 1.5 %，仿真结果如图 6、7 所示。

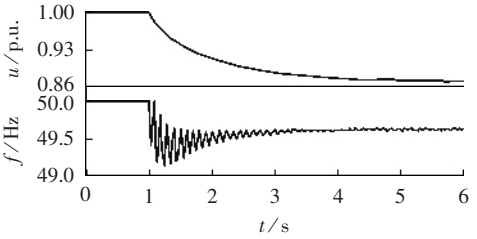

图 6　未安装 SVC 时的电压及频率变化

Fig.6 The variation of voltage and frequency without SVC

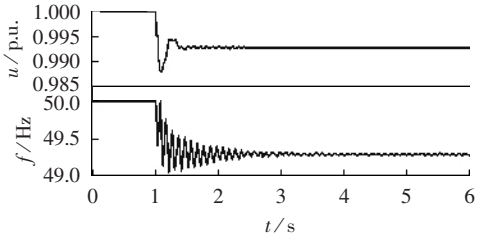

图 7　SVC 无功出力为 1 p.u.时的电压及频率变化

Fig.7 The variation of voltage and frequency when $Q_{SVC}=1$ p.u.

分析图 6、7 可知，当系统的负荷突然大幅度增加时，产生有功功率和无功功率缺额，造成系统的电压和频率下降，系统未投入 SVC 时，依靠发电机的励磁系统和调速器调节使系统达到新的稳定状态，电压稳定在 $u=0.872\,8$ p.u.，频率稳定在 $f=49.607\,5$ Hz。安装 SVC 后，系统的电压水平稳定在 $u=0.992\,8$ p.u.，频率稳定在 $f=49.281\,1$ Hz，与未安装 SVC 时相比，电压接近 1 p.u.，而频率却降低了 0.326 4 Hz。所以，SVC 的无功出力能力越强，系统频率质量反而越差。

若系统内调速器调节性能较弱或者响应较慢时，在进行无功－电压控制的时候，系统的频率将受到更大的威胁。设系统的有功和无功功率分别增至发电机原所带功率的 2 和 2.5 倍，发电机的无功－电

压调节系数为3%,原动机的有功-频率调节系数为2.5%。设发电机低频保护整定在46 Hz时切除发电机,SVC的最大无功出力为3 p.u.。仿真结果如图8~11所示,只显示频率变化情况。

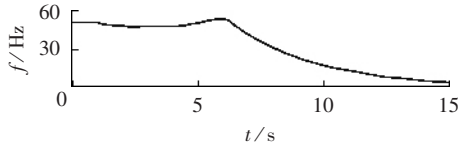

图8 未安装SVC时的频率变化

Fig.8 The variation of frequency without SVC

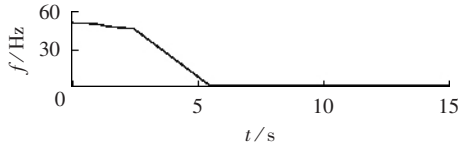

图9 SVC无功出力为3 p.u.时的频率变化

Fig.9 The variation of frequency when Q_{SVC}=3 p.u.

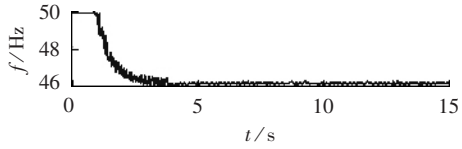

图10 当频率小于48 Hz时限制SVC出力为0.3 p.u.时的频率变化

Fig.10 The variation of frequency with restriction of Q_{SVC}=0.3 p.u. when f<48 Hz

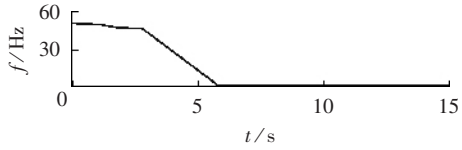

图11 当频率小于48 Hz时限制SVC出力为0.4 p.u.时的频率变化

Fig.11 The variation of frequency with restriction of Q_{SVC}=0.4 p.u. when f<48 Hz

由图9可知,系统安装SVC后,电压水平得以提高,使系统的有功功率缺额情况变得严重,又由于系统内的发电机调速器调频性能制约,系统频率快速下降,这个过程历时非常短,当系统频率下降到46 Hz时,发电机组低频保护动作,发电机组被切除,造成系统的频率崩溃。所以,当系统的调频能力较差时,系统在大干扰过程中的频率稳定性反而比电压稳定性更加重要,如果一味地稳定电压,将可能造成系统频率崩溃。为了使频率不至于发生崩溃,在利用SVC进行无功补偿时应考虑频率的变化,由图10、11可知,若在频率降至48 Hz时,降低SVC出力至0.3 p.u.,则可使频率稳定在46.2 Hz,但是如果出力降为0.4 p.u.,频率仍将崩溃。由此可见,选择合适的动作频率值及无功出力都十分必要。

3 结论

以上仿真结果及分析表明:

a. 利用诸如SVC等FACTS无功补偿装置可显著提高电力系统电压稳定性,但是在调节过程中应考虑频率的变化,不适当的控制策略不但影响频率质量,可能还会带来其他更为严重的后果;

b. 在进行无功补偿时,除了以电压为补偿参考量,同时引入频率的动态响应确定装置的动作时间和出力大小以协调电压和频率的控制也十分必要。

参考文献:

[1] 程浩忠. 电力系统无功电压稳定性[M]. 北京:中国电力出版社,2001.

[2] 傅旭,王锡凡,杜正春. 电力系统电压稳定性研究现状及其展望[J]. 电力自动化设备,2005,25(2):1-9.
FU Xu,WANG Xi-fan,DU Zheng-chun. Survey of power system voltage stability study[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(2):1-9.

[3] TAYLOR C W. Power system voltage stability[M]. 北京:中国电力出版社,2001.

[4] 蔡邠. 电力系统频率[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,1999.

[5] WG 38-01,Task Force No.2. Static var compensators[R]. Paris:CIGRE,1986.

[6] 吴家泉,谭昆玲,阮永平. 电力系统无功补偿仿真分析[J]. 电力电容器,2005(4):18-20.
WU Jia-quan,TAN Kun-ling,RUAN Yong-ping. Simulating and analyzing of power system reactive power compensation[J]. Power Capacitor,2005(4):18-20.

[7] 吴天明. Matlab电力系统设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社,2004.

[8] 彭建飞,任岷,王树锦. Matlab在电力系统仿真研究中的应用[J]. 计算机仿真,2005,22(6):193-196.
PENG Jian-fei,REN Min,WANG Shu-jin. Application of Matlab in the simulation of power system[J]. Computer Simulation,2005,22(6):193-196.

[9] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002.

[10] 马幼捷,陈寿孙,张宝霖. SVC非线性控制对改善电力系统稳定的研究[J]. 清华大学学报:自然科学版,1994,34(4):1-8.
MA You-jie,CHEN Shou-sun,ZHANG Bao-lin. A study on nonlinear SVC control for improving power system stability[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology,1994,34(4):1-8.

[11] 郭琼,李晨晖. 计及电动机动态的电压稳定问题仿真分析[J]. 继电器,2005,33(5):12-14.
GUO Qiong,LI Chen-hui. Simulation and analysis of voltage stability concerning induction motors dynamics[J]. Relay,2005,33(5):12-14.

[12] 袁季修. 防止电力系统频率崩溃的紧急控制[J]. 电力自动化设备,2002,22(4):1-4.
YUAN Ji-xiu. Emergency control for preventing frequency collapse power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(4):1-4.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

吴 起(1982-),男,河南桐柏人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行控制与分析计算(**E-mail**:woo_qi@sohu.com);

林 莉(1974-),女,四川泸州人,博士研究生,主要研究方向为电力系统运行控制与分析计算;

牟道槐(1941-),男,重庆人,教授,主要研究方向为电力系统运行控制与分析计算。

Influence of SVC on power system frequency stability

WU Qi, LIN Li, MU Dao-huai, CHEN Jin

(Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The simulation model of power systems is established with Matlab, in which the induction motor model and static constant impedance model are included as loads. The SVC (Static Var Compensator) adopts the first-order linear practical model, and its influence on system frequency, such as the compensating capacity, operating time and control strategy, are simulated and analyzed for two disturbances: one of parallel lines breaks off permanently; system load increases sharply. For the former condition, SVC can stabilize the frequency at rating value when the motor load takes a small proportion. For the latter condition, SVC brings negative impact on frequency stability. The more reactive power SVC outputs, the worse the frequency quality becomes. When the frequency adjustment capability of system is poor and the output of SVC is very large, the collapse of frequency will be accelerated. So the frequency feedback should be introduced into SVC control system, and the output of SVC should be reduced to a reasonable value when the monitored frequency is under a fixed value.

Key words: power system; static var compensator; frequency