

静止无功补偿器对感应电动机负荷电压稳定性的影响

李康, 康积涛, 陈芝奔, 王敏

(西南交通大学电气工程学院, 四川成都 610031)

摘要:以简单的两节点系统为研究对象,采用考虑机电暂态过程的三阶感应电动机负荷模型,详细分析了静止无功补偿器(SVC)在小扰动和大扰动情况下对系统电压稳定性的影响。仿真结果表明,在小扰动情况下安装SVC可以提高感应电动机负荷的最大负载转矩和电压水平;在大扰动情况下能够减小故障对暂态电压稳定产生的影响,并且能够延长暂态电压稳定的极限切除时间,提高系统的暂态稳定性。

关键词:感应电动机负荷;静止无功补偿器;小扰动;大扰动;电压稳定

Abstract: Taking a simple two - node power system as the subject and using the third - order model of induction motor load with the electromechanical transient process , the influences of static var compensator (SVC) on system voltage stability are analyzed in the case of small disturbance and large disturbance. The simulation results show that installing SVC can increase the maximum load torque and voltage level in the case of small disturbance and can decrease the influence of fault on transient voltage stability in the case of large disturbance , and can extend the critical clearing time of transient voltage stability and enhance the transient stability.

Key words: induction motor load; static var compensator (SVC) ; small disturbance; large disturbance; voltage stability

中图分类号:TM712 文献标志码:A 文章编号:1003 - 6954(2011)06 - 0026 - 04

随着负荷的不断增长和系统传输容量的增大,电力系统的运行状态越来越接近其电压稳定极限。近些年,国内外发生了一系列电压崩溃事故,电压稳定问题已经成为电力系统研究领域的焦点^[1]。负荷特性是影响电压稳定性的重要因素,电压稳定主要是负荷稳定^[2]。电力系统中感应电动机负荷所占的比重最大,在工业负荷中其比例高达90%以上,并且具有快速恢复特性。感应电动机负荷对系统动态电压稳定和暂态电压稳定有重要的影响。因此,有必要在小扰动(如负荷增长等)和大扰动(如线路故障等)情况下研究影响感应电动机负荷电压稳定性的因素。

文献[3]分析了感应电动机参数对小干扰电压稳定的影响,并没有考虑提高小干扰电压稳定的控制措施;文献[4]研究了感应电动机负荷特性对暂态电压稳定的影响;文献[5]提出了暂态电压稳定极限切除时间的概念;文献[6]通过时域仿真法分析了输电线路电抗、并联补偿容抗和感应电动机负荷参数的变化对电力系统暂态电压稳定的影响;文献[7]分析了感应电动机动态负荷特性对电压稳定的影响,指出电动机比重越大,系统电压稳定性越脆弱。静止无功补偿器(static var compensator SVC)是常用的无功电压补偿装置,下面对比安装SVC前后的仿真结果得出,

SVC可以提高感应电动机负荷的动态和暂态电压稳定性。

1 系统数学模型

采用无穷大系统带感应电动机负荷的模型来分析系统电压稳定性。系统的等值模型如图1所示。 Z 为线路阻抗,忽略电阻的影响, Z 的取值为 $j0.2$ 。电压 U_1 所在的母线为无穷大母线,幅值为1。

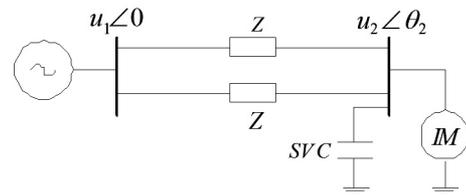


图1 系统的等值模型

电动机采用三阶模型^[8-10]。

$$\begin{cases} T_j \frac{ds}{dt} = T_m - T_e \\ T' \frac{dE'_x}{dt} = -E'_x - (x_s - x'_s) I_y + \omega_0 T' E'_y s \\ T' \frac{dE'_y}{dt} = -E'_y + (x_s - x'_s) I_x - \omega_0 T' E'_x s \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中 s 为转子滑差; ω_0 为同步转速; T_j 和 T' 为转子惯性时间常数和定子暂态开路时间常数; E'_x 和 E'_y 为转子暂态电势的 X 轴和 Y 轴分量; I_x 和 I_y 分别为定子电流的 X 轴和 Y 轴分量; r_s 为定子电阻; x 和 x' 分别为定子漏抗和暂态电抗; T_m 、 T_e 分别为机械负载力矩和电磁转矩,在标么值下分别等于感应电动机的机械功率和电磁功率,因此可用以下两式表示。

$$T_m = K[\alpha + (1 - \alpha)(1 - s)^\beta] \quad (2)$$

$$T_e = E'_x I_x + E'_y I_y \quad (3)$$

其中 k 为感应电动机的负荷率,也是此处选取的控制参数; α 为感应电动机中恒转矩部分的比例系数; β 为与负载特性有关的指数。以上各系统的取值均来自文献[8]。

采用没有附加控制的 SVC 一阶模型^[11],其数学模型可以表示为

$$T_c \dot{B} = -B + K_c(u_{ref} - u) \quad (4)$$

式中 B 为 SVC 的等效补偿电纳; T_c 为 SVC 控制时间常数; K_c 为 SVC 的放大倍数; u_{ref} 为负荷电压控制参考值。在下面如无特别说明, $T_c = 0.2$, $K_c = 10$, $u_{ref} = 1$ 。

系统的潮流方程式(5)所示,节点电压和电流用直角坐标表示

$$\begin{cases} e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) + P_i = 0 \\ f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) + Q_i = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中 e_i 和 f_i 表示节点电压的实轴和虚轴分量; P_i 和 Q_i 表示节点处的负荷功率; j 为与节点 i 相连的节点。联立式(1)、(5)可以构成完整的系统方程。当在负荷侧安装 SVC 时,将式(4)加入系统方程,并在式(5)中计及 SVC 发出的无功功率。

2 分析方法

电力系统是非常复杂的非线性系统,其动态行为应该用微分-代数方程(DAE)来描述^[12],可用式(6)表示。

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y, \mu) \\ 0 = g(x, y, \mu) \end{cases} \quad (6)$$

式中 x 表示系统的微分状态变量; y 表示系统的代数变量; μ 表示系统的控制参数。

在稳态情况下,电力系统运行在平衡条件下,在小扰动范围内,为了考察系统的局部动态稳定性,可以在平衡点附近线性化。

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = D_x f(x_0, y_0) dx + D_y f(x_0, y_0) dy \\ 0 = D_x g(x_0, y_0) dx + D_y g(x_0, y_0) dy \end{cases}$$

令: $A = D_x f(x_0, y_0)$, $B = D_y f(x_0, y_0)$,

$$C = D_x g(x_0, y_0), \quad D = D_y g(x_0, y_0)。$$

通过消去代数变量,可得到描述系统动力学特性的微分状态方程组。

$$\frac{dx}{dt} = (A - BD^{-1}C)x$$

式中 $A_{sys} = A - BD^{-1}C$ 为系统状态矩阵,由分岔理论可知,系统的动态稳定性完全可由系统状态矩阵的特征值确定。

当负荷连续变化时,采用连续法通过预测、校正、参数化等步骤求得系统的完整平衡解流形,并且每追踪一步根据特征值的情况判断系统是否出现分岔情况。这样可以得到系统完整的 PV 曲线,同时可以判断出系统平衡点的稳定性情况。

当线路发生短路故障时,感应电动机负荷的负载转矩来不及变化,系统的控制参数恒定不变,在故障期间及故障消失一段时间内仿真系统各变量的变化情况,并由此得出系统是否暂态失稳。

3 小扰动情况下的仿真结果分析

3.1 安装 SVC 后的系统的平衡解流形

图 2 中实线和虚线分别代表安装 SVC 前后系统的平衡解流形。负荷侧安装 SVC 后,感应电动机的最大负载转矩(曲线中用圆圈标注,下同)和电压水平都有明显的提高。表 1 给出两种情况下感应电动机的最大负载转矩及相应的电压值和滑差(IM 代表只有感应电动机负荷,IM-SVC 表示安装 SVC)。

表 1 鞍结分岔点处的系统变量值

	T_m	U_2	s
IM	0.781 2	0.901 6	0.040 4
IM-SVC	0.864 2	0.942 6	0.044

图 2 中平衡解流形上的圆圈代表系统发生鞍结分岔的位置,也就是感应电动机负荷所能达到的最大负载转矩的位置。由分岔理论可知,系统的鞍结分岔对应着系统单调失稳。鞍结分岔点处的时域仿真曲线如图 3 所示,从图中可以看出当系统加小的扰动

后 感应电动机负荷的负载转矩发生单调失稳。

3.2 SVC 放大倍数对平衡解流形的影响

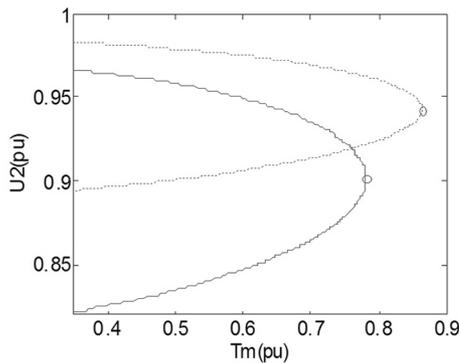


图 2 安装 SVC 前后系统的 $T_m - U_2$ 曲线

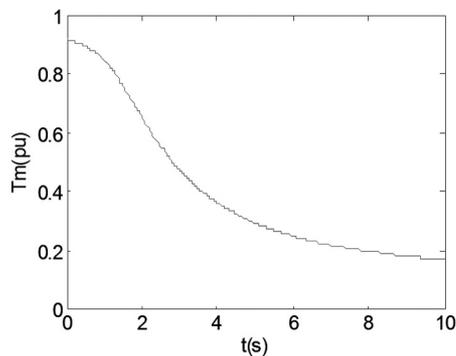


图 3 鞍结分岔点出的时域仿真曲线

系统中其他参数不变, SVC 放大倍数 $K_C = 5、10、15$ 时的 $T_m - U$ 曲线如图 4 所示。从图中可以看出, 当放大倍数增加时, 感应电动机的最大负载转矩增加。表 2 给出了 K_C 变化时系统变量的值。从结果可以得出, 提高 SVC 放大倍数有利于提高系统的电压水平和最大负载转矩。

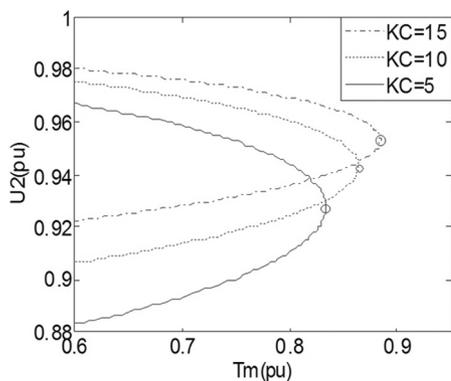


图 4 K_C 取不同值时系统的 $T_m - U_2$ 曲线

表 2 K_C 取不同值时对鞍结分岔点的影响

K_C	T_m	U_2	s
5	0.833 3	0.927 2	0.042 6
10	0.864 2	0.942 6	0.044
15	0.884 5	0.953	0.044 7

4 大扰动情况下的仿真结果分析

4.1 安装 SVC 前后的暂态电压稳定性比较

当系统遭受某些大的扰动, 动态负荷的稳定性问题也是值得关注的。这里主要考虑了当线路发生三相短路时, 故障的切除时间对感应电动机负荷的影响, 同时研究了安装 SVC 后故障极限切除时间的变化。

假设节点 1 和节点 2 之间的线路在靠近节点 1 侧发生三相对称短路(下面故障类型相同)。当系统中发生短路故障后如果继电保护装置的动作时间超过了此时系统的极限切除时间, 电压和负荷将无法恢复到故障前的稳定状态, 系统将会失去稳定性。

图 5 和图 6 中实线代表系统暂态稳定情况下的负载转矩和节点电压变化曲线, 当故障切除后, 负载转矩 T_m 和节点电压 U_2 经过一段时间可以恢复到故障前的稳态状况; 虚线为系统暂态失稳情况下的负载转矩和节点电压变化曲线, 故障切除时间超过系统暂态稳定的极限切除时间, 负载转矩 T_m 和节点电压 U_2 将无法恢复到故障前的稳态状况。

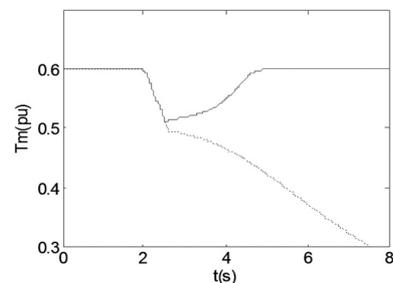


图 5 系统暂态稳定和暂态失稳下的 T_m 变化曲线

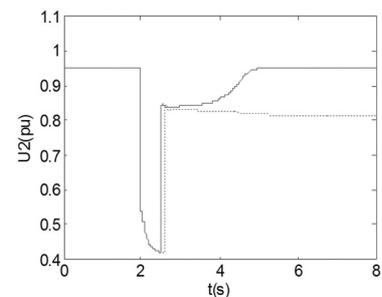


图 6 系统暂态稳定和暂态失稳下的 U_2 变化曲线

表 3 给出了安装 SVC 前后在相同的负载转矩情况下故障极限切除时间的变化。 T_1 表示只有感应电动机负荷的极限切除时间, T_2 表示安装 SVC 后的极限切除时间。从表中可以看出, 安装 SVC 后故障极限切除时间变长, 这降低了对继电保护装置的动作时

间的要求 增强了感应电动机负荷的暂态稳定性。

表 3 安装 SVC 极限切除时间的变化

T_m	0.5	0.6	0.7
T_1	1.067	0.536	0.253
T_2	3.438	1.399	0.697
$T_2 - T_1$	2.371	0.863	0.444

图 7、图 8 分别表示在故障持续时间相同的情况下,安装 SVC 前后节点电压和感应电动机负荷吸收的无功变化情况。不装设 SVC 时,在负荷恢复过程中节点电压下降较大,同时感应电动机负荷吸收大量的无功功率,这是造成负荷节点电压较低的原因,并且负荷恢复时间较长。安装 SVC 后,SVC 提供了大量的无功功率,防止大幅度电压下降,而且缩短了负荷恢复时间。

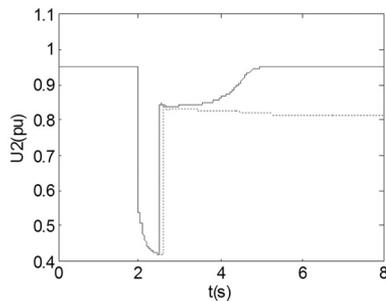


图 7 相同故障切除时间的 U_2 暂态曲线

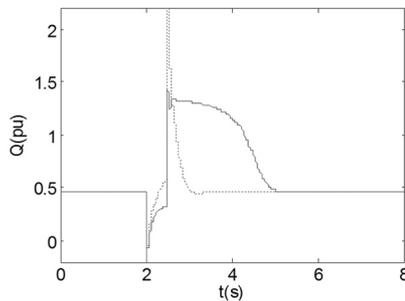


图 8 相同故障切除时间的 Q 暂态曲线

4.2 SVC 参数对故障极限切除时间的影响

表 4 给出了 SVC 的时间常数 T_c 对故障极限切除时间的影响。从中可以看出,SVC 时间常数越大,极限切除时间越短,越不利于系统的暂态电压稳定。

表 4 SVC 时间常数对极限切除时间的影响

T_c	0.04	0.2	1
T	1.471	1.399	1.212

表 5 给出了 SVC 放大倍数对故障极限切除时间的影响。从中可以看出,SVC 放大倍数越大,故障极限切除时间越长,降低了对继电保护设备的动作要求,提高了系统的暂态电压稳定性。

表 5 SVC 放大倍数对极限切除时间的影响

K_c	5	10	15
T	0.891	1.399	2.43

5 结 论

在感应电动机负荷侧安装 SVC,一方面可以增加最大负载转矩,提高系统的电压水平,保证电动机负荷的稳定运行;另一方面,可以延长极限切除时间,减小大扰动对系统的影响,增强感应电动机负荷的暂态电压稳定性,使感应电动机负荷快速恢复稳态运行。同时,时间常数较小,放大倍数较大的 SVC 有利于感应电动机负荷的动态电压和暂态电压稳定。

参考文献

- [1] 赵兴勇,张秀彬,苏小林. 电力系统电压稳定性研究与分岔理论[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 87-95.
- [2] Vournas C D, Sauer P W, Pai M A. Relationships between Voltage and Angle Stability of Power Systems[J]. International Journal of Electrical Power and Energy System, 1996: 493-500.
- [3] 李林,康积涛,张学群,等. 感应电动机参数对小干扰电压稳定影响[J]. 四川电力技术, 2010, 33(3): 68-70.
- [4] El-Sadek M Z, Abdelbarr F N. Effects of Induction Motor Load in Provoking Transient Voltage Instabilities[J]. Electric Power Systems Research, 1989, 17(2): 119-127.
- [5] El-Sadek M Z. Voltage Instabilities Subsequent to Short-circuit Recoveries[J]. Electric Power Systems Research, 1991, 21(1): 9-16.
- [6] 孙华东,周孝信,李若梅. 感应电动机负荷参数对电力系统暂态电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 1-6.
- [7] 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.
- [8] 章健. 电力系统负荷模型与辨识[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [9] PrabhaKundur. Power System Stability and Control(电力系统稳定与控制)[M]. 北京: 中国电力出版, 2002.
- [10] 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.
- [11] 杨秀,金红核,郭晨吉,等. 应用分岔理论分析 SVC 对电力系统电压稳定性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 7-11.

(下转第 52 页)

降低其接地电阻。

3.3 线路易击区段地形核实

由于线路易击区段处于跨域云顶山区的海拔最高地段,线路出现大跨越,同时地形的影响使得对个别杆塔容易遭受雷电绕击,因此需要对杆塔所处地形进行现场核实已进一步确定方案。

经现场核实,线路41号、43号、44号、47号杆塔位于山脊上,且线路档距大,杆塔两边均为陡坡,地形对线路的屏蔽作用已基本失去,线路极易遭受绕击。而42号塔虽位于线路海拔最高点,且落雷统计数量最高,但其所处地形相对平坦,遭受绕击的可能性不大,无需进行整治。

3.4 线路防雷整治方案制定

在综合分析线路实际情况后,决定对线路部分杆塔安装线路避雷器,以提高线路耐雷水平,避雷器选型为YH10WX-108/281。安排加装线路避雷器的杆塔及其情况如下。

(1) 32号塔,海拔高度为769m,大号侧大档距。直路塔,绝缘子配置为FXWB2-110/100,杆塔代号SZT2-24,投运两年来落雷数量22次。

(2) 41号塔,海拔高度为810m,小号侧高落差,两侧档距大。杆塔代号SJ1-18,耐张塔,绝缘子配置为双串9片XWP2-70。投运两年来落雷数量13次,出现雷害1次。

(3) 43号塔,海拔高度为779m,两侧落差较大,大号侧档距大。杆塔代号SZT2-28,直路塔,绝缘子配置为FXWB2-110/100,投运两年来落雷数量21次。

(4) 44号塔,海拔高度为688m,小号侧档距大。杆塔代号110JGu2-24。直路塔,绝缘子配置为FXWB2-110/100,投运两年来落雷数量21次。

(5) 47号塔,海拔高度为584m,两侧落差大,小号侧大档距。杆塔代号SJ1-21,耐张塔,绝缘子配置为双串9片XWP2-70,投运两年来雷定位系统落

(上接第29页)

[12] 彭志炜,胡国根,韩祯祥.基于分叉理论的电力系统电压稳定性分析[M].北京:中国电力出版社,2005.

作者简介:

李康(1984)男,山东人,硕士研究生,主要从事电力系统稳定性方面的研究;

康积涛(1962)男,教授,博士,主要从事调度自动化系

雷数量17次,出现雷害2次。

4 线路防雷整治实施效果

2009年9月1日,线路按照制定的整治方案加装了线路避雷器,完成了改造。整治后的线路经受了在2009年9月10日雷暴日、2010年和2011年两年的雷雨季节考验,未发生雷击跳闸,避雷器的动作情况见表2。

表2 避雷器动作情况统计

安装杆塔号	安装位置(相)	动作情况/次			备注
		L1相	L2相	L3相	
32号	L1、L2、L3	0	3	0	计时间为 2011年9月
41号	L1、L2、L3	3	0	0	
43号	L1、L2、L3	0	1	0	
44号	L1、L2、L3	0	0	0	
47号	L1、L2、L3	1	3	0	

5 结 语

(1) 线路防雷整治要综合分析线路历次雷击故障、线路走廊雷电活动情况、地形地貌及线路绝缘配置,有针对性采取相应措施,方能取得较好效果。

(2) 加装线路避雷器可以有效提高杆塔的耐雷水平,降低线路雷击跳闸率,提高线路运行可靠性,特别是针对特殊地形的防止雷电绕击有较好的效果。

参考文献

- [1] 程学启,杨春雷,咸日常,等.线路避雷器在输电线路防雷的应用[J].中国电力,1999,32(8):66-67.
- [2] 鲁世发,杜元三,严宜军,等.110kV线路防雷综合治理方案浅谈[J].湖北电力,2005,29(21):30-31.

作者简介:

吴晓晖(1974)男,工程师,从事电力系统高电压设备及信息化系统管理。(收稿日期:2011-10-10)

统,电力系统无功优化计算,电压稳定性、工业测控的研究工作;

陈芝奔(1987)男,浙江人,硕士研究生,主要从事电力系统潮流优化方面的研究;

王敏(1988)男,湖北人,硕士研究生,主要从事电力系统次同步振荡和软件开发等方面的研究。

(收稿日期:2011-07-18)