

## 含可控并补输电网络距离三段保护的灵敏度分析

李生虎

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 输电系统的安全运行受保护装置在各种扰动下的动作性能影响。不必要的保护动作将断开线路, 加剧网络负荷, 导致连锁事故。研究了距离三段保护的动作性能, 将其动作裕度定义为两端节点电压的函数。保护动作裕度对节点电压和节点功率的灵敏度系数, 反映了输电系统对各种扰动的脆弱程度。将SVC的电压控制特性量化为保护裕度和并联电纳间的灵敏度, 定义其为控制系数。研究发现当保护动作裕度较小时, 控制系数接近常数, SVC控制效果可以近似线性表示; 不同地点的并联补偿可能增大或者减小保护的动作裕度, 可以根据控制系数的符号予以快速判断。

**关键词:** 距离三段保护; 并联补偿; 动作裕度; 灵敏度; 控制系数; 输电系统

**Sensitivity analysis to the zone 3 impedance relays for transmission system  
with controllable shunt compensation**

LI Sheng-hu

(Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The security of the transmission system after various disturbances is dependent on the relays' performance. Undesirable relay operation will trip the lines and lead to cascading events. In this paper, the operation margin of mho relays (zone 3 impedance relays) is equivalently redefined as function of bus voltages instead of line impedance. The sensitivities of the operation margin to bus voltage and bus power are derived to quantify the vulnerability of transmission system. The contribution of the shunt compensation by SVC is analyzed based on the sensitivities (control factors) of the operation margin to the shunt susceptance. It is found that the control effect of SVC is approximately linear when the mho relay has relative smaller operation margin. In this range the linear model based on the control factors is accurate enough to simulate the control effect. It is also found that the shunt compensations at different locations may yield opposite effect to the operation margin of the mho relays, which can be easily judged by the sign and the value of the control factors.

**Key words:** zone 3 impedance relay; shunt compensation; operation margin; sensitivity; control factor; transmission system

中图分类号: TM773

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)05-0007-06

## 0 引言

输电系统的安全性依赖于扰动过程中保护装置的合理动作。输电线路的距离三段保护(MHO继电器), 保护范围延伸至下一段线路, 其动作性能受网络结构变化影响。保护范围外故障或者开关操作引起的潮流分布, 可能引起其误动作<sup>[1~4]</sup>。美国2003年大停电事故的事故起因, 即为重载线路的距离三段保护不合理动作断开线路, 引起线路连锁跳闸。基于距离一段、二段配合要求, 距离三段保护的动作时间一般为数百毫秒到数秒, 而SVC等可控并联补偿装置可以在几个周波内对电压波动做出快速

反应, 从而有可能改善距离三段保护在不良运行条件下(如重载网络电压下降过程中)的动作性能, 避免保护误动作。

基于距离三段保护和SVC动作特性, 本文研究了可控并补对距离三段保护的稳态动作性能的影响。传统的保护动作裕度以线路阻抗表示, 难以直接展开成线性控制形式, 本文首先将距离三段保护的动作裕度由阻抗形式改为等值的电压函数形式。根据保护动作裕度对节点电压和节点功率的灵敏度系数, 判断输电网络对故障或扰动的脆弱程度。然后将保护动作裕度线性展开成并联电纳形式, 将其灵敏度系数定义为SVC对保护动作裕度的控制系

数, 根据控制系数研究不同运行方式和补偿位置下 SVC 对距离三段保护动作性能的影响。

根据对 IEEE14 节点系统的计算结果发现, 当保护动作裕度较低, 保护可能误动作时, 控制系数变化较小, 此时 SVC 对保护的控性能可以近似线性表示; 根据控制系数的符号, 可以快速判断在不同运行方式下, 并联补偿是否增大或者减小了保护的裕度。采用控制系数的线性模型, 大大节约了连续潮流仿真的计算时间。对 FACTS 装置和保护装置共同作用的量化分析, 有助于控制关键输电元件, 维护输电网络的完整性。

## 1 距离三段保护的裕度

### 1.1 保护裕度

含 SVC 并联补偿的输电网络如图 1 所示, 线路  $mn$  两端安装了距离三段保护。不失一般性, 设 SVC 安装在节点  $j$ , 其并联电纳为  $B_{sh,j}$ 。节点  $m$  侧的线路潮流  $\bar{S}_{mn}$  和测量阻抗  $\bar{Z}_{amn}$  如下所示, 其中  $\bar{Z}_{mn} = Z_{mn} \angle \varphi_{line}$  是线路阻抗,  $\bar{U}_m = U_m \angle \theta_m$  是节点  $m$  电压,  $\theta_{mn}$  是线路两端节点电压相角的差值<sup>[5]</sup>。

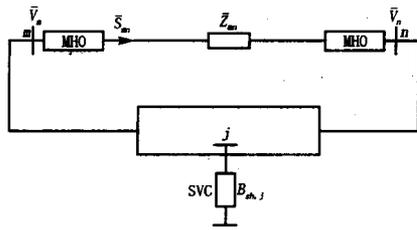


图1 含SVC补偿的输电网络

Fig. 1 Transmission system of SVC compensation

$$\bar{S}_{mn} = S_{mn} \angle \varphi_{mn} \quad (1)$$

$$\bar{Z}_{amn} = Z_{amn} \angle \varphi_{amn} \quad (2)$$

$$S_{mn} = \frac{\sqrt{(U_m^2 - U_m U_n \cos \theta_{mn})^2 + (U_m U_n \sin \theta_{mn})^2}}{Z_{mn}} \quad (3)$$

$$\varphi_{mn} = \varphi_{line} - \arctan \left( \frac{U_m U_n \sin \theta_{mn}}{U_m^2 - U_m U_n \cos \theta_{mn}} \right) = \varphi_{line} - \Delta \varphi \quad (4)$$

$$S_{mn} \cos(\Delta \varphi) = \frac{U_m^2 - U_m U_n \cos \theta_{mn}}{Z_{mn}} \quad (5)$$

$$Z_{amn} = U_m^2 / S_{mn}, \varphi_{amn} = \varphi_{mn} \quad (6)$$

距离三段保护的阻抗特性如图 2 所示, 其中  $Z_{Rmn}$  是阻抗继电器的整定阻抗,  $\alpha$  是偏移系数,  $AB=2AE$

$=Z_{Rmn}$ ,  $OA = \alpha Z_{Rmn}$ ,  $OC = Z_{opmn}$ ,  $OD = Z_{amn}$ 。  $CD = OD - OC$  为保护动作裕度  $M_{mn}^{(0)}$ , 其定义见式 (7), 其中包含电压和功率项, 而功率又是电压的函数, 因此比较难以直接进行分析控制。

$$M_{mn}^{(0)} = Z_{amn} - Z_{opmn} = U_m^2 / S_{mn} - Z_{opm} \quad (7)$$

以下推导电压函数形式的保护动作裕度。由于偏移系数  $\alpha$  一般很小, 将线段  $CD$  近似为  $AD - AC$ , 重新定义保护裕度  $M'_{mn}$ :

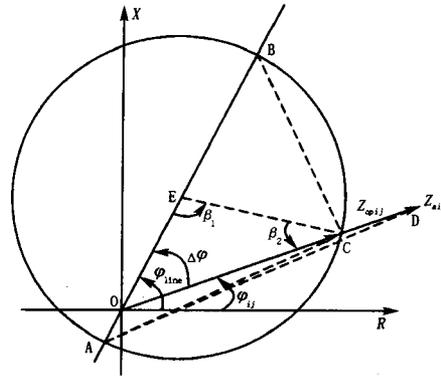


图2 距离三段保护的阻抗特性

Fig.2 Operation characteristic of mho relay

$$M'_{mn} = Z_{amn}^2 - Z_{opmn}^2 = OD^2 - OC^2 \approx AD^2 - AC^2 = \alpha^2 Z_{Rmn}^2 + \frac{U_m^4}{S_{mn}^2} + 2\alpha Z_{Rmn} \frac{U_m^2}{S_{mn}} \cos(\Delta \varphi) - Z_{Rmn}^2 \cos^2(\Delta \varphi) \quad (8)$$

$$AD^2 = \alpha^2 Z_{Rmn}^2 + Z_{amn}^2 + 2\alpha Z_{Rmn} Z_{amn} \cos(\Delta \varphi) \quad (9)$$

$$AC^2 = AE^2 + EC^2 - 2AE \times EC \times \cos \beta_1 = 4EC^2 \cos^2(\Delta \varphi) = Z_{Rmn}^2 \cos^2(\Delta \varphi) \quad (10)$$

$$\beta_1 = \pi - \beta - \Delta \varphi \approx \pi - 2(\Delta \varphi) \quad (11)$$

为简化表达形式, 将  $M'_{mn}$  乘以  $S_{mn}^2$ , 得到保护动作裕度的最终表达形式  $M_{mn}$  式 (12)。新的动作裕度与原始裕度  $M_{mn}^{(0)}$  并不相等, 但是通过将保护裕度定义为零可以证实, 两者具有相同的保护范围。新的动作裕度用线路两端节点电压函数取代了线路阻抗函数, 因此提供了对距离三段保护的直接控制手段。

$$M_{mn} = M'_{mn} S_{mn}^2 = \alpha^2 Z_{Rmn}^2 \frac{U_m^4 - 2U_m^3 U_n \cos \theta_{mn} + U_m^2 U_n^2}{Z_{mn}^2} + U_m^4 +$$

$$2\alpha z_{Rmn} \frac{U_m^4 - U_m^3 U_n \cos \theta_{mn}}{Z_{mn}} - Z_{Rmn}^2 \frac{U_m^4 - 2U_m^3 U_n \cos \theta_{mn} + U_m^2 U_n^2 \cos^2 \theta_{mn}}{Z_{mn}^2} \quad (12)$$

对于无偏移特性的距离三段保护,  $\alpha = 0$ , 其动作裕度为:

$$M_{mn} = U_m^4 - Z_{Rmn}^2 \frac{U_m^2 (U_m - U_n \cos \theta_{mn})^2}{Z_{mn}^2} \quad (13)$$

## 1.2 关键输电线路

在负荷激增或者保护范围外线路短路等各种扰动下, 阻抗动作裕度较小的继电器可能误动作, 因此需要关注这些继电器的动作性能, 以维护输电网络的完整性。在当前运行点, 将线路距离三段保护动作裕度对节点电压线性展开式(14), 式中  $C$  是保护动作裕度对节点电压的灵敏度系数矩阵,  $\Delta\theta$  和  $\Delta U$  是节点电压相角和幅值变化量。

$$\Delta M_{mn} = [C] \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = [C_\theta \quad C_v] \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta U \end{bmatrix} =$$

$$C_{\theta m} \Delta\theta_m + C_{\theta n} \Delta\theta_n + C_{vm} \Delta U_m + C_{vn} \Delta U_n \quad (14)$$

上述线性关系表明, 距离保护的误动特性不仅取决于保护裕度的数值大小, 而且取决于保护裕度对节点电压的灵敏度, 即各种可能发生的扰动对线路两端电压的影响。灵敏度系数较大的输电线路, 扰动引起电压变化较大, 这些线路是电网中较为脆弱环节。对于重载网络, 为避免距离三段的不合理动作, 可以通过对节点电压的控制予以调节。鉴于距离三段的动作时间配合要求, SVC 的快速电压响应可能提供理想的控制效果。

## 2 基于灵敏度的并补效果分析

根据潮流方程, 建立距离三段保护动作裕度对节点电压和节点功率的灵敏度形式(15)~(17), 其中  $\Delta P$  和  $\Delta Q$  是节点有功和无功功率变化量,  $J_{P\theta}$ 、 $J_{PV}$ 、 $J_{Q\theta}$ 、 $J_{QV}$  是雅可比矩阵  $J$  的子矩阵,  $T$  是保护动作裕度对节点功率的灵敏度系数。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\Delta M = [T] \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$[T] = [C][J]^{-1} = [t_{m,j}] \quad (17)$$

为研究无功控制效果, 设式(15)中  $\Delta P = 0$ , 简化雅可比矩阵, 得到无功功率与电压的线性关系:

$$\Delta U = K \Delta Q \quad (18)$$

$$\Delta\theta = L \Delta U \quad (19)$$

$$K = (J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV})^{-1} = [\kappa_{ij}] \quad (20)$$

$$L = -J_{P\theta}^{-1} J_{PV} = [l_{ij}] \quad (21)$$

当节点  $j$  是 SVC 补偿节点,  $Q_j$  包括来自发电机和负荷的无功  $Q_{Dj}$  和来自 SVC 的无功  $Q_{sh,j}$ :

$$\Delta Q_j = \Delta Q_{Dj} + \Delta Q_{sh,j} \quad (22)$$

由于 SVC 的无功上限和下限取决于节点电压, 以及可调并联电纳的上下限, 而 SVC 电压控制效果又依赖于系统静态电压特性, 本文没有采用 SVC 的等值无功功率或者恒定节点电压模型, 而是采用了对地补偿支路的等值并联电纳模型。忽略零值电纳谐振点, 忽略多并联电容投切引起的分段控制特性, SVC 并联支路电纳如下, 其中  $B_{sh,max}$  和  $B_{sh,min}$  分别是并补支路的容性和感性电纳限额。

$$B_{sh,min} \leq B_{sh} \leq B_{sh,max} \quad (23)$$

为研究 SVC 控制效果, 将  $Q_{Dj}$  设置为零, 将  $Q_{sh,j}$  线性展开:

$$\Delta Q_{sh,j} = \Delta (B_{sh,j} U_j^2) \approx$$

$$\Delta B_{sh,j} U_j^2 + 2B_{sh,j} U_j \Delta U_j \quad (24)$$

将式(24)代入式(18), 得到以并联电纳表示的 SVC 补偿点电压变化量  $U_j$  式(25)。其他节点电压变化量  $U_i$  见式(26)。为表达方便, 式(25)和式(26)被写成统一格式(27), 其中  $\delta_{ij}$  是节点电压对并联电纳的灵敏度系数。

$$\Delta U_j = \frac{\kappa_{jj} U_j^2}{1 - 2\kappa_{jj} B_{sh,j} U_j} \Delta B_{sh,j} \quad (25)$$

$$\Delta U_i = \kappa_{ij} U_j^2 \Delta B_{sh,j} + 2\kappa_{ij} B_{sh,j} U_j \Delta U_j =$$

$$\left( \kappa_{ij} U_j^2 + \frac{2\kappa_{ij} \kappa_{jj} B_{sh,j} U_j^3}{1 - 2\kappa_{jj} B_{sh,j} U_j} \right) \Delta B_{sh,j} \quad (26)$$

$$\Delta U_i = \delta_{ij} \Delta B_{sh,j} \quad (27)$$

将式(27)和式(19)代入式(14), 得到节点  $j$  处 SVC 并联电纳与线路  $mn$  距离三段保护动作裕度的线性表达形式, 其中  $e_{mn,j}$  是  $j$  处可控并联电纳对线路  $mn$  首端距离三段保护的控制系数。  $t_{mn,j}$  和  $e_{mn,j}$  反映了节点电压和并联电纳对保护动作裕度的影

响,即外部扰动的严重程度或者控制措施的有效程度。

$$\Delta M_{mn} = C_{\theta m} \Delta \theta_m + C_{\theta n} \Delta \theta_n + C_{v m} \Delta U_m + C_{v n} \Delta U_n = e_{m n, j} \Delta B_{s h, j} \quad (28)$$

$$e_{m n, j} = C_{\theta m} \sum_{\rho} (l_{m \rho} \delta_{\rho j}) + C_{\theta n} \sum_{\rho} (l_{n \rho} \delta_{\rho j}) + C_{v m} \delta_{m j} + C_{v n} \delta_{n j} \quad (29)$$

式(28)显示, SVC 的快速电压控制可以防止保护动作裕度下降,避免以下运行场合中的一些不合理保护动作行为:

- (1) 即使在正常运行方式下,保护动作裕度也较小的一些关键线路,如长距离输电线路。
- (2) 低压减载继电器没有正确动作的重载网络。
- (3) 故障后动态过程中的电压振荡可能诱发保护裕度较小的阻抗继电器误动作。

上述算法的控制误差主要在于线性截断误差,可以通过分段线性控制予以降低。另外由于算法基于潮流方程雅可比矩阵,因此平衡节点的设置会产生一定影响。当电网规模越大,平衡节点的影响越小。由于 SVC 动作速度远快于机组无功控制速度,在 SVC 动作期间, PV 节点的无功出力变化可以忽略不计。

### 3 算例分析

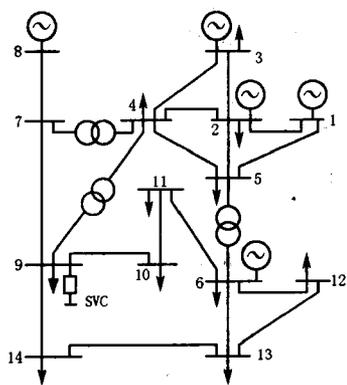


图3 IEEE14节点测试系统  
Fig. 3 IEEE14-bus test system

将上述模型应用于 IEEE 14 节点系统(图3)。除变压器支路 4-7, 4-9, 5-6, 以及节点 9 的 SVC 对地支路外,其他线路上安装了距离三段保护。继电器整定时采用了最小 0.85 倍额定电压,最大 1.15

倍线路额定潮流,最大负荷角 30°。SVC 并联支路容性电纳限额为 0.60 pu。

以阻抗和电压函数表示的距离三段保护动作裕度如表 1 所示。根据阻抗表示的计算结果,输电系统中,线路 7-9 首端保护的裕度最小。

表 1 距离三段保护动作裕度

Tab.1 Operation margin of zone 3 impedance relays

线路	保护动作裕度/pu	
	阻抗函数形式	电压函数形式
1-2	3.6667	0.9984
1-5	4.8240	0.9964
2-3	5.4882	0.9636
2-4	4.3377	0.9634
2-5	5.9346	0.9652
3-4	27.7860	0.8990
4-5	4.2011	0.8918
6-11	6.9940	0.8689
6-12	9.7148	0.8816
6-13	3.1860	0.8150
7-8	3.2868	0.6367
7-9	1.2454	0.6791
9-10	19.8837	0.7937
9-14	9.6056	0.7877
10-11	13.8139	0.7787
12-13	40.2390	0.8306
13-14	10.1610	0.8001

线路 7-9 首端保护的裕度对两端节点电压相角和幅值的灵敏度系数见表 2。保护动作裕度对电压幅值的灵敏度比对电压相角的灵敏度更大,说明无功功率的平衡和分布引起电压幅值的变化,将对距离三段造成较大影响。

表 2 保护动作裕度对节点电压的灵敏度

Tab. 2 Sensitivities of the operation margin to bus voltage

$C_{\theta 7}$	$C_{\theta 9}$	$C_{v 7}$	$C_{v 9}$
-0.6935	0.6935	-14.4282	17.6254

在 SVC 并联补偿下,电压变化与并联电纳变化的灵敏度系数  $\delta_{ij}$  如表 3 所示。节点 9 的并联补偿对 9, 10 和 14 等节点的电压控制效果更加明显。

逐渐增加 SVC 并联电纳,线路 7-9 的保护动作裕度如图 4 所示,其中保护裕度的准确结果由潮流计算得到。当并联电纳为 0.13 pu 时,控制系数  $e_{79,9}$  达到峰值 1.5634 pu,然后开始下降,由此导致精确模型和线性模型之间的差距逐渐增大。尽管线性模

型存在计算误差,但是在控制系数峰值的左边,计算误差极小,线性模型可以取代潮流模型,从而节约大量计算时间。也正是在该区域,保护裕度较小,受扰动动作的可能较大,需要加以控制。

表3 并联补偿对节点电压的影响

Tab. 3 Voltage change with shunt compensation at bus 9

节点	灵敏度/pu	节点	灵敏度/pu
1	0	8	0.184 0
2	0.039 9	9	0.241 4
3	0.069 1	10	0.227 4
4	0.092 7	11	0.191 2
5	0.080 4	12	0.161 5
6	0.152 6	13	0.168 1
7	0.189 0	14	0.213 2

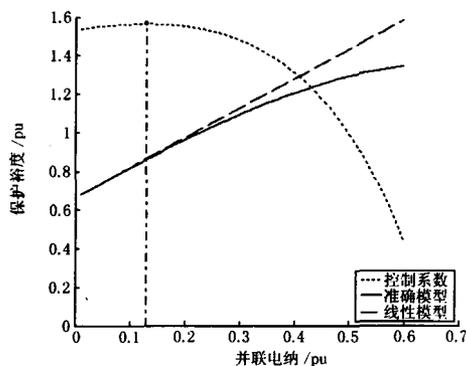


图4 基态负荷下的保护动作裕度

Fig.4 Operation margin of mho relay on line 7-9

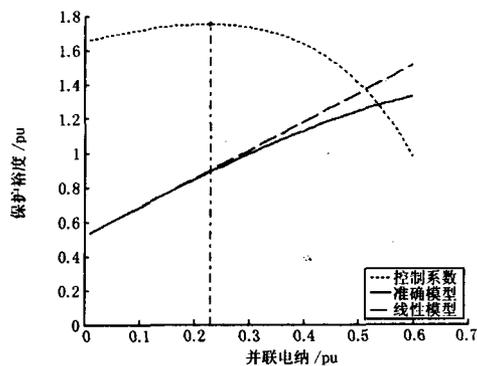


图5 重载运行方式下的保护动作裕度

Fig.5 Operation margin of mho relay on line 7-9 under heavy loads

将负荷和机组出力都增加 1.2 倍,使得系统处于重载状态,控制系数和动作裕度如图 5 所示。当并联电纳为 0.23 pu 时,控制系数达到峰值 1.749 5 pu。与图 4 相比,重载运行时,线性模型的控制系

数更大,近似线性的控制范围更宽。

进一步考虑保护范围外输电元件故障的影响。假设线路 10-11 开断,基态负荷和重载负荷下的保护动作裕度如图 6 和 7 所示。在图 6 中,当并联电纳为 0.11 pu 时,控制系数达到峰值 1.826 6 pu;在图 7 中,当并联电纳为 0.20 pu 时,控制系数达到峰值 2.063 2 pu。与图 4 和图 5 相比,输电元件的开断加剧了网络载荷,控制系数也随之增大,进一步说明线性模型更适合重载网络。

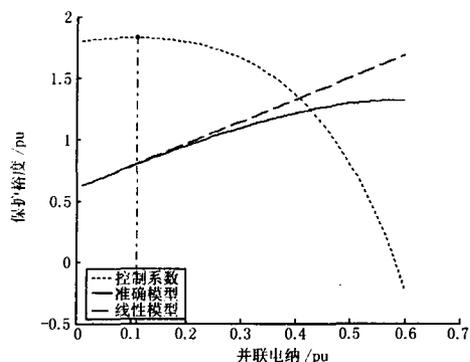


图6 基态负荷,线路10-11开断时的保护动作裕度

Fig. 6 Operation margin of mho relay on line 7-9 with outage of line 10-11

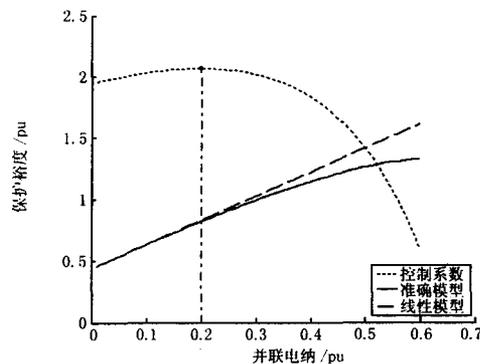


图7 重载方式,线路10-11开断时的保护动作裕度

Fig. 7 Operation margin of mho relay on line 7-9 with outage of line 10-11 under heavy loads

将 SVC 从节点 9 移至节点 7,以考察不同位置的并联补偿效果。在基态负荷下,保护动作裕度如图 8 所示。控制系数从正值逐渐减小为负值,从而引起保护动作裕度大幅下降。对此解释是,节点 7 的并联补偿增加了该节点电压和线路 7-9 上的线路潮流,从而降低了阻抗继电器的测量阻抗和保护动作裕度。在此情况下,根据控制系数的符号,可以快速判断并联补偿是增加还是降低了保护动作裕度。

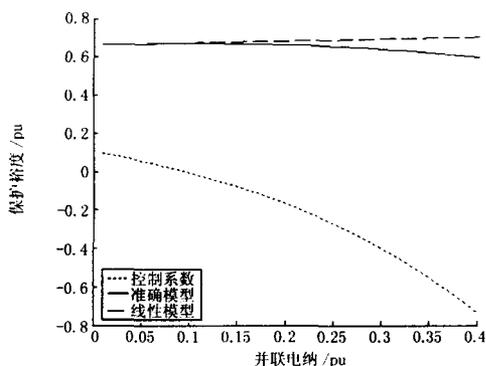


图8 节点7补偿时保护动作裕度

Fig.8 Operation margin of mho relay on line 7-9 with SVC installed at bus 7

#### 4 结论

本文基于距离三段保护动作特性,研究了可控并补装置对输电网络的安全性能的影响。将阻抗继电器的动作裕度定义为节点电压的函数,展开得到其对节点电压和节点功率的函数,实现对保护动作的潮流控制。将可控并补装置并联电纳对距离三段保护动作裕度的灵敏度系数定义控制系数,判断可控并补对距离三段动作特性的影响。将算法应用于IEEE 14节点系统,得到以下结论:

(1) 保护动作裕度对节点电压、节点功率等扰动量的灵敏度系数,描述了由于距离三段保护不合理动作引起的输电网络脆弱性。

(2) 当保护动作裕度较小,保护可能误动时,基于控制系数的线性模型可以模拟 SVC 的快速控

制,计算误差极小。

(3) 对于不同线路的距离三段保护, SVC 并联补偿可能存在正面或者负面影响,可根据控制系数的符号予以快速判断。

#### 参考文献

- [1] Horowitz S H, Phadke A G. Third Zone Revisited [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1): 23-29.
- [2] Marttila R J. Effect of Transmission Line Loading on the Performance Characteristics of Polyphase Distance Relay Elements[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(4): 1466-1474.
- [3] Tamronglak S, Horowitz S H, Phadke A G, et al. Anatomy of Power System Blackouts: Preventive Relaying Strategies[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 708-715.
- [4] 赵自刚, 张洪, 赵春雷. 美加大停电后关于继电保护的一些思考[J]. 继电器, 2004, 32(21): 76-79. ZHAO Zi-gang, ZHANG Hong, ZHAO Chun-lei. Reflection of Protection Relay After the Great 8.14 Power Failure of America and Canada[J]. Relay, 2004, 32(21): 76-79.
- [5] 李生虎. 线路距离III段保护动作裕度的节点功率控制算法[J]. 电力系统自动化, 2006,30(16):31-35,84. LI Sheng-hu. Power Injection Control to Operation Margin of Zone 3 Impedance Relay on Transmission Lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16) :31-35,84.

收稿日期: 2006-08-27; 修回日期: 2006-11-18

作者简介:

李生虎(1974-),男,博士,副教授,研究方向为电力系统安全分析与控制、电力系统可靠性、柔性输配电技术。  
E-mail: lishenghu2004@hotmail.com

(上接第6页 continued from page 6)

WANG Wei-jian. The Principle and Application of Relaying Protection of Electrical Main Equipments[M]. Beijing: Cina Electric Power Press, 2002.

- [2] 陈生贵,等. 电力系统继电保护[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2003.

CHEN Sheng-gui, et al. The Relaying Protection of Electric Power System[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2003.

- [3] Yacamini R, Bronzeado H. Transformer Inrush Calculations Using a Coupled Electromagnetic Model[J]. IEEE Proceedings, 1994, 141(6): 491-498.

- [4] 李英超,等. 电力变压器励磁涌流和故障电流的仿真研究[J]. 继电器, 2002, 30(6): 29-32.

LI Ying-chao, et al. The Emulation and Analysis of the Inrush and Malfunction Current of Power Transformer[J]. Relay, 2002, 30(6): 29-32.

- [5] 王雪,等. 电力变压器励磁涌流和故障电流的仿真研究

[J]. 高压电器, 2003, 39(6): 11-14.

WANG Xue, et al. The Emulation and Analysis of the Inrush and Malfunction Current of Power Transformer[J]. High Voltage Electric Apparatus, 2003, 39(6): 11-14.

- [6] 符杨,等. 计及铁心动态磁化特性的三相变压器励磁涌流的仿真研究[J]. 变压器, 1997, 34(9): 4-11.

FU Yang, et al. The Emulation and Analysis of the Inrush of Three Phases Transformer Considering the Saturation of Iron Core[J]. Transformer, 1997, 34(9): 14-11.

收稿日期: 2006-09-08; 修回日期: 2006-12-01

作者简介:

吕俐婷(1983-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护; E-mail: hzonx@yahoo.com.cn

罗建(1960-),男,副教授,研究方向为电力系统自动化、电力系统继电保护。