

可控串补潮流控制对距离三段动作裕度的影响

李生虎, 丁明, 张维, 王京景

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 由于保护范围较长, 距离三段保护对重载网络潮流分布较为敏感。作为主要柔性输电元件, 可控串补常用于重载电网潮流控制。基于电压函数的距离三段保护动作裕度, 建立了串补线路不同受控参数, 如线路电抗、线路电流幅值、线路有功潮流, 与保护裕度间的灵敏度系数, 用以量化可控串补对距离三段的影响。计算结果表明, 不同位置、不同受控参数及参考值下, 可控串补可能增加或者降低保护裕度。可控串补和距离保护的合理整定, 有利于协调保护装置和柔性输电设备, 降低重载电网运行风险。

关键词: 距离保护; 可控串补; 潮流控制; 灵敏度; 输电系统

Power flow control effect with TCSC on the operation margin of zone 3 impedance relays

LI Sheng-hu, DING Ming, ZHANG Wei, WANG Jing-jing

(Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Zone 3 impedance relays (mho relays) are sensitive to power flow distribution in stressed conditions due to their overreaching design. In this paper, the operation condition for mho relays is defined by the operation margin between the apparent impedance and the operation impedance. The sensitivities between the operation margin and the controlled parameters of TCSC, such as line reactance, line-current magnitude, and active power flow, are found to quantify the control effect on the relay performance. Numerical results on IEEE RTS system shows that series compensation at different locations, controlled parameters, or reference values, will increase or decrease the operation margin. Studies on the performance of zone 3 relays in compensated system is helpful to the coordination of relay protections and FACTS devices, and quantify the vulnerability of stressed power system.

Key words: distance protection; TCSC; power flow control; sensitivity analysis; transmission system

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)03-0005-06

0 引言

由于保护范围较长, 距离三段保护对潮流分布较为敏感, 当电网重载、电压下降时可能不合理跳闸, 造成重大停电事故^[1, 2], 可通过自适应保护或者潮流控制方案予以避免^[3, 4]。通过调节晶控电抗器TCR导通角来控制线路运行参数, 晶闸管控制串联补偿器(TCSC)可以控制线路潮流, 增加输电能力, 避免线路重载^[5-7]。理想补偿方案在控制潮流的同时, 应不降低保护的動作性能。

本文采用灵敏度方法量化可控串补对距离三段保护的影响。将保护动作裕度定义为测量阻抗与动作阻抗的差值, 推导出不同受控参数, 如线路电抗、电流、有功潮流, 对保护动作裕度的影响, 量化受

控参数范围内的保护裕度变化情况, 并节约大量潮流方案的计算时间。IEEE RTS 测试系统计算结果表明, 不同位置、不同受控策略、控制参数可控串补, 可能增加或降低保护裕度。对可控串补和距离保护相互影响的量化分析, 有利于协调保护装置和柔性输电设备, 寻找关键输电元件, 降低电网运行风险。

1 距离保护动作特性

距离三段保护(mho 继电器)可根据潮流情况整定, 即当线路潮流不大于 S_{\max} , 母线电压不低于 V_{\min} , 负荷角不大于 φ_{\max} 时, 保护不该动作, 如式(1)所示, 其中继电器最大转矩角 φ_T 常取线路阻抗角 φ_{line} 。电网拓扑结构和潮流分布常与保护整定时不同, 为避免距离三段不合理动作, 2005年NERC建议 S_{\max} 取 1.15 倍 15 min 冬季载荷, V_{\min} 取 0.85 倍额定电压, φ_{\max} 取 30° ^[8]。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50707006); 安徽省优秀青年科技基金资助项目(08040106825)

$$Z_R = \frac{V_{\min}^2}{S_{\max} \cos(\varphi_T - \varphi_{\max})} \quad (1)$$

1.1 保护动作裕度

线路 ij 首端保护测量阻抗 \bar{z}_{aij} 和潮流 \bar{S}_{ij} 为:

$$\bar{z}_{aij} = V_i^2 / \bar{S}_{ij}^* = Z_{aij} \angle \varphi_{aij} \quad (2)$$

$$\bar{S}_{ij} = \bar{V}_i \bar{I}_{ij}^* = S_{ij} \angle \varphi_{ij} \quad (3)$$

$$Z_{aij} = V_i^2 / S_{ij} \quad (4)$$

$$\varphi_{aij} = \varphi_{ij} \quad (5)$$

$$S_{ij} = \frac{\sqrt{(V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij})^2 + (V_i V_j \sin \theta_{ij})^2}}{Z_{ij}} \quad (6)$$

$$\varphi_{ij} = \varphi_{\text{line}} - \tan^{-1} \left(\frac{V_i V_j \sin \theta_{ij}}{V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}} \right) \quad (7)$$

图 1 中 OB、OC、OD 分别为距离继电器的整定阻抗、动作阻抗和测量阻抗。距离三段的动作裕度, 即测量阻抗与动作阻抗的差, 展开为节点电压的函数^[9, 10]:

$$M_{ij} = Z_{aij} - Z_{opij} =$$

$$\frac{Z_{ij} V_i^2 - Z_{Rij} (V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij})}{\sqrt{(V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij})^2 + (V_i V_j \sin \theta_{ij})^2}} = \frac{a_1}{a_2} \quad (8)$$

$$Z_{opij} = Z_{Rij} \cos(\varphi_{\text{line}} - \varphi_{ij}) = Z_{Rij} \cos(\Delta\varphi) \quad (9)$$

$$\cos(\Delta\varphi) = \frac{V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij}}{\sqrt{(V_i^2 - V_i V_j \cos \theta_{ij})^2 + (V_i V_j \sin \theta_{ij})^2}} \quad (10)$$

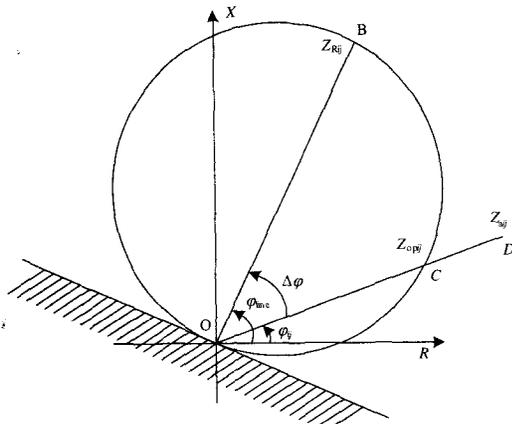


图 1 mho 继电器的阻抗特性

Fig.1 R-X characteristic of mho relays

1.2 保护裕度对节点电压的灵敏度

对图 2 串补控制系统, 距离三段保护动作裕度线性展开为式(11), 其中 $C_{\theta i}$ 、 $C_{\theta j}$ 、 C_{V_i} 和 C_{V_j} 分别为保护裕度对两端电压的灵敏度系数式(12)~(15), C_{Xij} 为保护裕度对线路电抗的灵敏度系数。对受控串补线路, C_{Xij} 定义见式(16), 否则为零。

$$\Delta M_{ij} = C_{\theta i} \Delta \theta_i + C_{\theta j} \Delta \theta_j + C_{V_i} \Delta V_i + C_{V_j} \Delta V_j + C_{Xij} \Delta X_{ij} \quad (11)$$

$$C_{\theta i} = \frac{\partial M_{ij}}{\partial \theta_i} = -V_i V_j \sin \theta_{ij} \frac{a_2^2 Z_{Rij} + a_1 V_i^2}{a_2^3} \quad (12)$$

$$C_{\theta j} = \frac{\partial M_{ij}}{\partial \theta_j} = -C_{\theta i} \quad (13)$$

$$C_{V_i} = \frac{\partial M_{ij}}{\partial V_i} = \frac{2Z_{ij}V_i - 2Z_{Rij}V_i + Z_{Rij}V_j \cos \theta_{ij}}{a_2} - \frac{a_1(2V_i^3 - 3V_i^2V_j \cos \theta_{ij} + V_iV_j^2)}{a_2^3} \quad (14)$$

$$C_{V_j} = \frac{\partial M_{ij}}{\partial V_j} = \frac{Z_{Rij}V_i \cos \theta_{ij}}{a_2} + \frac{a_1(V_i^3 \cos \theta_{ij} - V_i^2V_j)}{a_2^3} \quad (15)$$

$$C_{Xij} = \frac{\partial M_{ij}}{\partial X_{ij}} = \frac{V_i^2}{a_2} \frac{\partial Z_{ij}}{\partial X_{ij}} = \frac{X_{ij}V_i^2}{a_2 Z_{ij}} \quad (16)$$

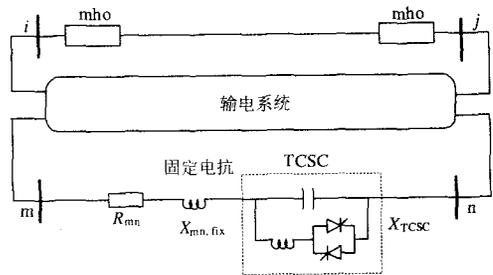


图 2 可控串补系统

Fig.2 Power system with TCSC

2 可控串补对距离三段的影响

对图 2 中串补线路, 线路电抗包括固定电抗 $X_{mn,fix}$ 和可变电抗 X_{TCSC} 式(17)。考虑多模块结构, 认为可变电抗在感性上限 X_{ind} 和容性上限 X_{cap} 内连续可调式(18)。

$$X_{mn} = X_{mn,fix} + X_{TCSC} \quad (17)$$

$$X_{ind} \geq X_{TCSC} \geq X_{cap} \quad (18)$$

基于 TCR 触发角控制, TCSC 可实现对线路电抗、线路电流幅值和有功潮流的控制^[11]。受控参数的变化改变了电网潮流分布, 从而可能影响距离三

段的动作特性。

2.1 可控串补系统的静态电压特性

线性潮流方程如下, ΔP 和 ΔQ 是节点有功和无功增量, $J_{p\theta}$ 、 J_{pv} 、 $J_{q\theta}$ 、 J_{qv} 是雅可比子矩阵, J_{px} 和 J_{qx} 是节点功率对串补线路电抗的灵敏度。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{p\theta} & J_{pv} & J_{px} \\ J_{q\theta} & J_{qv} & J_{qx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta X_{mn} \end{bmatrix} \quad (19)$$

节点有功和无功对串补线路电抗的灵敏度由受控线路潮流决定式(20)~(23), 可类似后面式(42)求解。

$$J_{px(m,mn)} = -\frac{\partial \Delta P_m}{\partial X_{mn}} = \frac{\partial P_m}{\partial X_{mn}} = \frac{\partial P_{mn}}{\partial X_{mn}} \quad (20)$$

$$J_{qx(m,mn)} = -\frac{\partial \Delta Q_m}{\partial X_{mn}} = \frac{\partial Q_m}{\partial X_{mn}} = \frac{\partial Q_{mn}}{\partial X_{mn}} \quad (21)$$

$$J_{px(n,mn)} = -\frac{\partial \Delta P_n}{\partial X_{mn}} = \frac{\partial P_n}{\partial X_{mn}} = \frac{\partial P_{nm}}{\partial X_{mn}} \quad (22)$$

$$J_{qx(n,mn)} = -\frac{\partial \Delta Q_n}{\partial X_{mn}} = \frac{\partial Q_n}{\partial X_{mn}} = \frac{\partial Q_{nm}}{\partial X_{mn}} \quad (23)$$

忽略相对较慢的负荷和发电机响应过程, 设式(19)中 ΔP 和 ΔQ 为零, 节点电压对串补线路电抗的关系如下, 其中 ξ 和 η 是灵敏度矩阵。

$$\Delta \theta = -\left(J_{p\theta} - J_{pv} J_{qv}^{-1} J_{q\theta}\right)^{-1} \left(J_{px} - J_{pv} J_{qv}^{-1} J_{qx}\right) \Delta X_{mn} = \xi \Delta X_{mn} \quad (24)$$

$$\Delta V = -\left(J_{qv} - J_{q\theta} J_{p\theta}^{-1} J_{pv}\right)^{-1} \left(J_{qx} - J_{q\theta} J_{p\theta}^{-1} J_{px}\right) \Delta X_{mn} = \eta \Delta X_{mn} \quad (25)$$

2.2 保护动作裕度与可控串补的关系

当 TCSC 用于控制线路电抗, 将式(24)和(25)代入式(11), 得到串补电抗对保护动作裕度的线性关系见式(26), 其中 $\alpha_{ij,mn}$ 是灵敏度因子。如果 mn 和 ij 是同一条线路, $\alpha_{ij,ij}$ 定义见式(28)。

$$\Delta M_{ij} = \left(C_{\theta i} \xi_{i,mn} + C_{\theta j} \xi_{j,mn} + C_{vi} \eta_{i,mn} + C_{vj} \eta_{j,mn}\right) \Delta X_{mn} = \alpha_{ij,mn} \Delta X_{mn} \quad (26)$$

$$\alpha_{ij,ij} = C_{\theta i} \xi_{i,ij} + C_{\theta j} \xi_{j,ij} + C_{vi} \eta_{i,ij} + C_{vj} \eta_{j,ij} + C_{xij} \quad (27)$$

2.3 保护动作裕度与受控线路电流幅值

将式(28)线路电流的平方式线性展开式(29), 其中 $D_{\theta i}$ 、 $D_{\theta j}$ 、 D_{vi} 、 D_{vj} 是其对电压相角和幅值的灵敏度系数, D_{xmn} 是其对线路电抗的灵敏度系数, $\delta_{mn,mn}$ 是总灵敏度系数(30)~(34)。

$$I_{mn}^2 = \frac{V_m^2 + V_n^2 - 2V_m V_n \cos \theta_{mn}}{R_{mn}^2 + X_{mn}^2} \quad (28)$$

$$\Delta I_{mn}^2 = D_{\theta m} \Delta \theta_m + D_{\theta n} \Delta \theta_n + D_{vm} \Delta V_m + D_{vn} \Delta V_n + D_{xmn} \Delta X_{mn} = \left(D_{\theta m} \xi_{m,mn} + D_{\theta n} \xi_{n,mn} + D_{vm} \eta_{m,mn} + D_{vn} \eta_{n,mn} + D_{xmn}\right) \Delta X_{mn} = \delta_{mn,mn} \Delta X_{mn} \quad (29)$$

$$D_{\theta m} = \frac{\partial I_{mn}^2}{\partial \theta_m} = \frac{2V_m V_n \sin \theta_{mn}}{R_{mn}^2 + X_{mn}^2} \quad (30)$$

$$D_{\theta n} = \frac{\partial I_{mn}^2}{\partial \theta_n} = -\frac{\partial I_{mn}^2}{\partial \theta_m} \quad (31)$$

$$D_{vm} = \frac{\partial I_{mn}^2}{\partial V_m} = \frac{2V_m - 2V_n \cos \theta_{mn}}{R_{mn}^2 + X_{mn}^2} \quad (32)$$

$$D_{vn} = \frac{\partial I_{mn}^2}{\partial V_n} = \frac{2V_n - 2V_m \cos \theta_{mn}}{R_{mn}^2 + X_{mn}^2} \quad (33)$$

$$D_{xmn} = \frac{\partial I_{mn}^2}{\partial X_{mn}} = -\frac{2X_{mn} \left(V_m^2 + V_n^2 - 2V_m V_n \cos \theta_{mn}\right)}{\left(R_{mn}^2 + X_{mn}^2\right)^2} \quad (34)$$

将式(29)代入式(26), 得到 TCSC 受控线路电流平方对保护动作裕度的关系如下, 其中 $\beta_{ij,mn}$ 是两者之间的灵敏度系数。

$$\Delta M_{ij} = \frac{\alpha_{ij,mn}}{\delta_{mn,mn}} \Delta I_{mn}^2 = \beta_{ij,mn} \Delta I_{mn}^2 \quad (35)$$

2.4 保护裕度与受控有功潮流的关系

将式(36)给出的线路有功潮流线性展开成式(37), 其中 $E_{\theta i}$ 、 $E_{\theta j}$ 、 E_{vi} 、 E_{vj} 是其对电压相角和幅值的灵敏度系数, E_{xmn} 是其对线路电抗的灵敏度系数, $\lambda_{mn,mn}$ 是总灵敏度系数(38)~(42)。

$$P_{mn} = \frac{R_{mn} \left(V_m^2 - V_m V_n \cos \theta_{mn}\right) + X_{mn} V_m V_n \sin \theta_{mn}}{R_{mn}^2 + X_{mn}^2} \quad (36)$$

$$\Delta P_{mn} = E_{\theta m} \Delta \theta_m + E_{\theta n} \Delta \theta_n + E_{vm} \Delta V_m + E_{vn} \Delta V_n + E_{xmn} \Delta X_{mn} = \left(E_{\theta m} \xi_{m,mn} + E_{\theta n} \xi_{n,mn} + E_{vm} \eta_{m,mn} + E_{vn} \eta_{n,mn} + E_{xmn}\right) \Delta X_{mn} = \lambda_{mn,mn} \Delta X_{mn} \quad (37)$$

$$E_{\theta m} = \frac{\partial P_{mn}}{\partial \theta_m} = \frac{R_{mn} V_m V_n \sin \theta_{mn} + X_{mn} V_m V_n \cos \theta_{mn}}{R_{mn}^2 + X_{mn}^2} \quad (38)$$

$$E_{\theta n} = \frac{\partial P_{mn}}{\partial \theta_n} = -\frac{\partial P_{mn}}{\partial \theta_m} \quad (39)$$

$$E_{vm} = \frac{\partial P_{mn}}{\partial V_m} = \frac{R_{mn} (2V_m - V_n \cos \theta_{mn}) + X_{mn} V_n \sin \theta_{mn}}{R_{mn}^2 + X_{mn}^2} \quad (40)$$

$$E_{vn} = \frac{\partial P_{mn}}{\partial V_n} = \frac{-R_{mn}V_m \cos \theta_{mn} + X_{mn}V_m \sin \theta_{mn}}{R_{mn}^2 + X_{mn}^2} \quad (41)$$

$$E_{xmn} = \frac{\partial P_{mn}}{\partial X_{mn}} = \frac{(R_{mn}^2 - X_{mn}^2)V_m V_n \sin \theta_{mn} - 2R_{mn}X_{mn}(V_m^2 - V_m V_n \cos \theta_{mn})}{(R_{mn}^2 + X_{mn}^2)^2} \quad (42)$$

将式(42)代入式(26), 得到 TCSC 受控有功潮流对保护动作裕度的关系如下, 其中 $\gamma_{ij,mn}$ 是两者之间的灵敏度系数。

$$\Delta M_{ij} = \frac{\alpha_{ij,mn}}{\lambda_{mn,mn}} \Delta P_{mn} = \gamma_{ij,mn} \Delta P_{mn} \quad (43)$$

上述线性模型计算误差主要在于截断误差, 在相同电网结构和运行参数下, 与潮流计算结果比较予以量化。必要时可采用分段线性模型。

距离三段的动作时间为零点几到几秒, TCSC 动作时间仅为几个周波, 因此对前者动作效果产生影响。作为一种预防控制手段, 分析可能运行方式下, 保护和串补参数设置的合理性, 需要大量潮流计算方案。本文建立算法可以量化给定运行方式下, 不同位置、不同受控策略、控制参数的可控串补装置, 对距离三段动作裕度控制效果的正面或者负面影响, 估计可控范围内动作裕度的变化, 有利于协调保护装置和柔性输电设备的参数设置, 降低电网运行风险, 并节约大量潮流方案的计算时间。

3 算例分析

算例系统采用 IEEE RTS 测试系统(图 3)^[12]。线路后备保护采用 mho 继电器。计算发现, 线路 16-14 动作裕度较小(图 4), 如果该线路跳闸, 将有多母线电压下降。

3.1 不同串补位置控制效果分析

通过比较保护裕度与受控线路参数的灵敏度系数, 可量化不同串补位置的控制效果(表 1)。在此基础上, 设计两个串补控制方案(表 2)。

(1) TCSC 用于控制线路电抗时, 控制效果由系数 α 体现。对大多数线路, α 为负, 容性串补将增加保护动作裕度, 但对于线路 9-11、11-14、15-16 等, α 为正, 容性补偿将降低保护动作裕度。

(2) TCSC 用于控制线路电流时, 控制效果由 δ 和 β 体现, 对大多数线路, δ 为负, 容性补偿将增加受控电流, 但线路 7-8, δ 为正值, 控制效果相反。对 3-9、8-9、19-20、13-23 等, β 为正, 参考电流增加将增加保护动作裕度, 而对线路 1-3、7-8、5-10 等, β 为负, 控制效果相反。

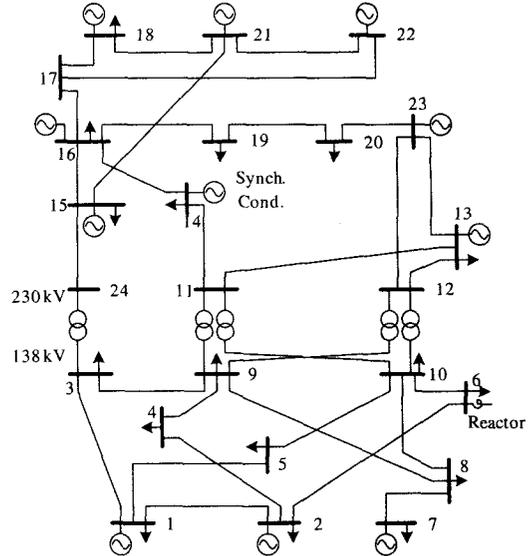


图 3 IEEE RTS 测试系统

Fig. 3 IEEE RTS test system

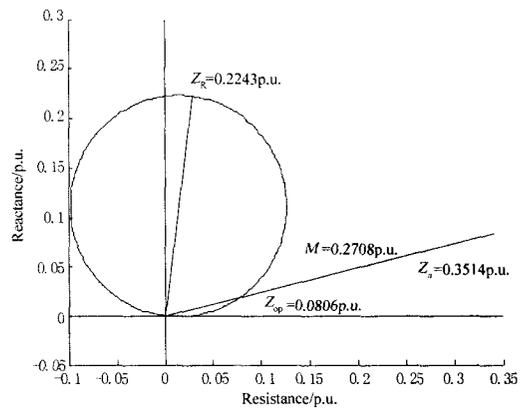


图 4 线路 16-14 始端保护测量阻抗

Fig.4 R-X diagram for mho relay on line 16-14

(3) TCSC 用于控制有功潮流时, 控制效果由系数 λ 和 γ 体现。对线路 15-16、16-14、16-19 等, λ 为负, 容性补偿将增加有功潮流, 而对于线路 16-17、17-18、15-21 等, λ 为正, 控制效果相反。对线路 19-20、15-24 等, γ 为正, 参考潮流增加将增加保护裕度, 而对于线路 11-13、12-23、13-23、3-24 等, γ 为负, 控制效果相反。

表 1 不同串补位置的灵敏度系数

Tab. 1 Sensitivities for different compensation locations

m	n	$\alpha_{16-14,mn}$ /p.u.	$\delta_{mn,mn}$ /p.u.	$\beta_{16-14,mn}$ /p.u.	$\lambda_{mn,mn}$ /p.u.	$\gamma_{16-14,mn}$ /p.u.
1	2	-0.0016	-0.0286	0.0575	-0.2150	0.0077
1	3	0.0153	-0.2134	-0.0717	-0.3566	-0.0429
2	4	-0.0158	-1.4723	0.0108	-1.4034	0.0113
1	5	-0.0500	-3.1880	0.0157	-2.3411	0.0214
2	6	-0.0269	-1.6215	0.0166	-1.4565	0.0185
7	8	-0.1986	2.8953	-0.0686	-0.0454	4.3764
3	9	-0.0049	-0.0423	0.1155	-0.1950	0.0251
4	9	-0.0006	-0.5292	0.0012	0.7511	-0.0009
8	9	-0.0015	-0.0320	0.0454	0.1917	-0.0076
5	10	0.0015	-0.0194	-0.0781	0.1672	0.0091
6	10	-0.0208	-4.5571	0.0046	2.1174	-0.0098
8	10	-0.0005	-0.1515	0.0030	-0.0638	0.0072
9	11	0.1653	-14.513	-0.0114	6.4203	0.0257
10	11	0.0979	-23.752	-0.0041	8.0642	0.0121
9	12	-0.1644	-14.323	0.0115	6.2994	-0.0261
10	12	-0.2682	-23.229	0.0115	7.9874	-0.0336
11	13	-0.7726	-43.194	0.0179	12.592	-0.0614
12	13	-0.0360	-44.874	0.0008	13.188	-0.0027
11	14	0.4715	-7.6433	-0.0617	4.4802	0.1052
15	16	0.1939	-51.262	-0.0038	-18.366	-0.0106
16	14	1.9676	-83.956	-0.0234	-16.387	-0.1201
16	17	-0.0649	-224.84	0.0003	35.875	-0.0018
17	18	-0.0015	-92.782	0.0000	25.357	-0.0001
16	19	-1.1040	-62.719	0.0176	-13.011	0.0849
19	20	-0.3473	-3.8904	0.0893	-3.0121	0.1153
15	21	-0.4775	-359.06	0.0013	46.880	-0.0102
18	21	0.0028	-37.659	-0.0001	16.107	0.0002
17	22	-0.0276	-19.134	0.0014	7.2596	-0.0038
21	22	-0.0471	-22.934	0.0021	7.9914	-0.0059
12	23	-0.2933	-8.0350	0.0365	4.7449	-0.0618
13	23	-0.0714	-0.1750	0.4080	0.2089	-0.3418
20	23	0.1476	-4.5337	-0.0326	3.9215	0.0376
3	24	-0.5456	-20.898	0.0261	6.0431	-0.0903
15	24	-0.5400	-21.095	0.0256	-6.2963	0.0858

表 2 可控串补方案

Tab.2 Series compensation schemes

线路	X_{ind} /p.u.	X_{cap} /p.u.
15-16	0.002	-0.012
16-14	0.005	-0.03

3.2 串补线路 15-16

在 TCSC 控制范围内, 图 5 和图 6 分别给出线路 15-16 受控参数及线路 16-14 保护裕度, 并与潮流计算结果进行比较。对受控线路电流平方, 感性极限误差为 -0.0036 p.u (-0.1877%), 容性极限误差为 -0.1741p.u (-6.1756%)。对受控有功潮流, 感性极限误差为 8.3280×10^{-4} p.u (-0.0597%), 容性极限误差为 -0.0398p.u (-2.3544%)。对保护动作裕度, 感性极限误差为 1.0702×10^{-5} p.u (0.0039%), 容性极限误差为 2.8879×10^{-4} p.u (0.1077%)。由图 7 中 β 和 γ 系数可见, 当参考电流或者有功潮流增加时, 保护动作裕度下降, 而且在 TCSC 可控范围内, β 和 γ 近似线性变化。

3.3 串补线路 16-14

在 TCSC 控制范围内, 图 8 和图 9 给出线路 16-14 的受控参数和保护动作裕度。对受控线路电流平方, 感性极限误差 -0.0199p.u (-0.2559%), 容性极限误差 -0.6946p.u (-6.1039%)。对受控线路有功功率, 感性极限误差 -0.0027p.u (-0.1013%), 容性补偿误差 -0.0920p.u (-2.7364%)。对保护动作裕度, 感性极限误差为 0.0019 p.u (0.6841%), 容性极限误差 0.0110p.u (5.4695%)。灵敏度模型得到的保护动作裕度, 存在一定误差, 原因在于: 灵敏度模型中没有根据线路电抗变化修正最大转矩角。根据图 10 的 β 和 γ , 当参考电流或者有功功率增加时, 保护动作裕度减小。在当前运行点附近, β 和 γ 近似恒定, 而在感性或者容性补偿极限时, 保护动作裕度随受控参数的变化较大, 此时需要协调保护整定参数和 TCSC 控制参数。

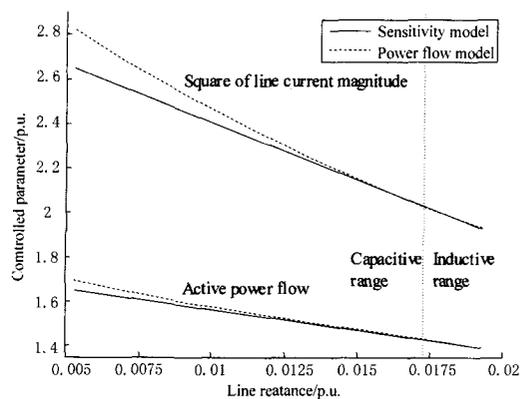


图 5 线路 15-16 受控参数

Fig.5 Controlled parameter with TCSC on line 15-16

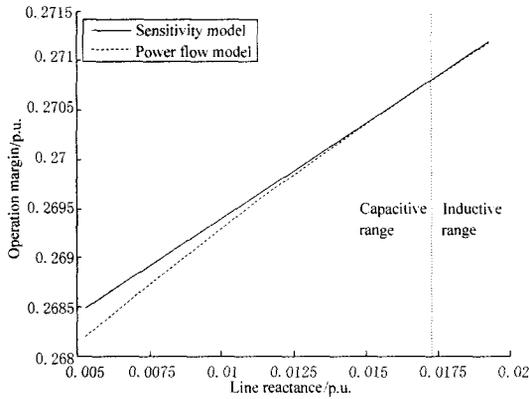


图 6 线路 16-14 保护动作裕度

Fig.6 Operation margin for line 16-14

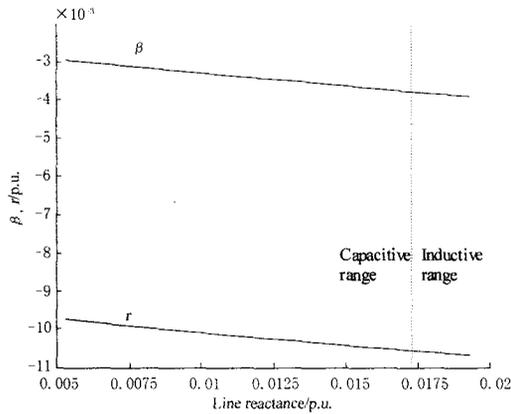


图 7 受控参数对保护裕度的灵敏度

Fig.7 Sensitivities of operation margin to reference parameter

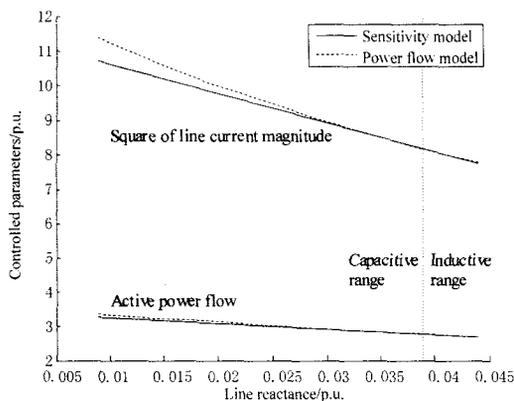


图 8 线路 16-14 受控参数

Fig.8 Controlled parameter with TCSC on line 16-14.

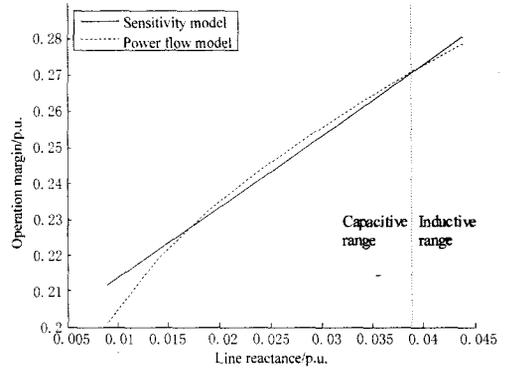


图 9 线路 16-14 串补时的保护裕度

Fig.9 Operation margin with TCSC on line 16-14.

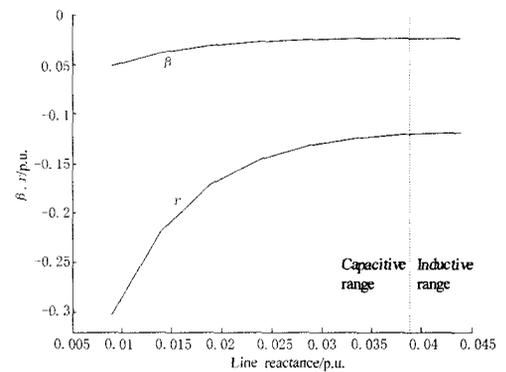


图 10 受控参数对保护裕度的灵敏度

Fig.10 Sensitivities of operation margin to reference parameter

4 结论

本文研究了可控串补潮流控制对线路距离三段保护动作裕度的影响, 得到以下结论:

(1) 将保护动作特性定义为保护动作裕度, 即测量阻抗与整定阻抗的差值。保护裕度对节点电压和线路电抗的灵敏度系数, 反映了保护对扰动的脆弱性, 以及柔性输电设备的控制后果。

(2) 基于线性潮流方程, 得到保护裕度对可控串补线路受控参数的灵敏度系数, 以及 TCSC 可控范围内保护裕度的变化。

IEEE RTS 系统计算结果表明, 可控串补可能对电网潮流分布及保护裕度产生不同影响。在某些运行方式下, 保护裕度对串补受控参数较为敏感, 需要特别注意。可控串补和距离的控制参数的合理整定, 有利于协调保护和柔性输电装置, 发现关键输电元件, 降低电网运行风险。

(下转第 26 页 continued on page 26)

- system in China. *Electric Power*, 1999, 32(2):24-28.
- [7] 陈文高. 配电网可靠性实用基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998, 111-138.
CHEN Wen-gao. Basis of Distribution System Reliability [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998:111-138.
- [8] 谢开贵, 尹春元, 周家启. 中压配电系统可靠性评估[J]. 重庆大学学报, 2002, 25(1):53-56
XIE Kai-gui; YIN Chun-yuan; ZHOU Jia-qi. Reliability Evaluation of Middle Voltage Distribution Networks[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2002, 25(1):53-56
- [9] Billinton R., Chen Hua, Zhou Jiaqi. Generalized n+2 State System Markov Model for Station-Oriented Reliability Evaluation [J]. *IEEE Transactions on Power System*, 1997,12(4):1511-1517
- [10] Billinton R., Chen Hua, Zhou Jiaqi. Individual Generating Station Reliability Assessment [J]. *IEEE Transactions on Power System*, 1999,14(4):1238-1244
- [11] 陈华, 周家启, 王耀辉. 瀑布沟水电站电气主接线方案可靠性计算[J]. 水电站设计, 1994, (10): 5.
CHEN Hua, ZHOU Jia-qi, WANG Yao-hui. Reliability calculation of the Chute Dyke Power Station Configuration [J]. *Design of Hydroelectric Power Station*, 1994, 10(3):67-73
- [12] 谢开贵, 董百强, 赵霞, 周家启. 大型变电站电气主接线可靠性综合分析系统[J]. *电力系统自动化*, 2006, 15(30):89-92
XIE Kai-gui, DONG Bai-qiang, ZHOU Jia-qi. Design and Application of Reliability Evaluation Software for Power Station[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 15(30):89-92
- [13] 董百强, 谢开贵, 周家启. 电站 3/2 接线和 4/3 接线的可靠性比较分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(10):10-15
DONG Bai-qiang, XIE Kai-gui, ZHOU Jia-qi. Comparison and Analysis of Reliability Between 3/2 Connection and 4/3 Connection of Station[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2006, 29(10):10-15
- [14] Billinton R. 周家启, 任震译. 电力系统可靠性评估[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1986
Billinton R, ZHOU Jia-qi, REN Zhen-yi. *Power System Reliability Evaluation*[M]. Chongqing: Science-Technology & Publication, 1986.

收稿日期: 2008-03-26; 修回日期: 2008-04-23

作者简介:

冯怡(1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划与可靠性. E-mail: ffyy.33@163.com

(上接第 10 页 continued from page 10)

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] Pinto de Sa J, Afonso J, Rodrigues R. A Probabilistic Approach to Setting Distance Relays in Transmission Networks [J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1997, 12(2): 681-686.
- [3] Mir M. Adaptive Vs. Conventional Reach Setting of Digital Distance Relays[J]. *Electric Power Energy Systems*, 1997, 43(2): 105-111.
- [4] Tseng K H, Kao W S, Lin J R. Load Model Effects on Distance Relay Settings[J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2003, 18(4): 1140-1146.
- [5] Xiao Y, Song Y H, Liu C C, et al. Available Transfer Capability Enhancement Using FACTS Devices[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2003, 18(1): 305-312.
- [6] Lu Y, Abur A. Static Security Enhancement Via Optimal Utilization of Thyristor-controlled Series Capacitors[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2002, 17(2): 324-329.
- [7] Fuente-Esquivel C R, Acha E, Ambriz-Perez H. A Thyristor Controlled Series Compensator Model for the Power Flow Solution of Practical Power Networks[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2000, 15(1): 58-64.
- [8] NERC. Relay Loadability Exceptions: Determination and Application of Practical Relaying Loadability Ratings[R]. www.nerc.com/~filez/spctf.html, 2005.
- [9] 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): 27-31.
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): 27-31.
- [10] Li Sheng-hu, Yorino N, Ding Ming, et al. Sensitivity Analysis to Operation Margin of Zone 3 Impedance Relays with Bus Power and Shunt Susceptance[J]. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2008, 23(1): 102-108.
- [11] Mathur R M, Varma R K. Thyristor-based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems[M]. New York: IEEE/Wiley; 2002.
- [12] IEEE Reliability Test System Task Force. IEEE Reliability Test System[J]. *IEEE Trans on Power Apparatus Systems*, 1979, 98(6): 2047-2054.

收稿日期: 2008-03-25

作者简介:

李生虎(1974-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为电力系统运行与控制、柔性输电、风力发电技术; E-mail: lishenghu2004@hotmail.com

丁明(1956-), 男, 教授, 研究方向为电力系统可靠性、新能源发电、柔性输电。