

电力系统零序互感耦合对接地保护影响的分析研究

湖北省电力中心调度所 王广学

摘要

本文主要论述了电力系统线路之间零序互感对接地保护的影响，在理论上进行了分析和研究。结合实例对接地距离保护进行了详细的分析。

一 概述

电力系统网络中线路之间零序互感耦合的存在，使得网络分析计算大为复杂，其运行状态的变化对接地保护有一定的影响。在电网分析计算中，有关零序互感耦合线路断开、挂检的数学模型及处理方法在文献 1 中有较详尽的论述，本文不再赘叙。本文主要论述以下几个问题：

1. 零序互感耦合线路挂检、断开对网络的影响分析及零序电流保护整定计算中应注意的问题。
2. 一组零序互感耦合线路中，有一回挂检后，另一回线路中间又发生接地故障的数学模型及其分析。
3. 零序互感耦合对接地距离保护影响的分析及其建议采取的补偿措施。

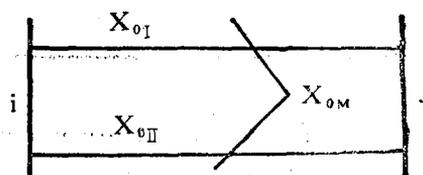
二 零序互感对网络的影响分析

(一) 互感耦合线路运行工况的分析

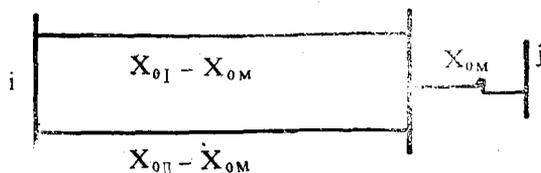
1. 双回共端互感线路

(1) 正常运行时：

如图 1 所示，正常运行时 i—j 两端的等值阻抗可计算如下：



(a) 网络图



(b) 等值图

图 1 零序互感耦合线路

$$X_{i,j0} = X_{0i} + (X_{0I} - X_{0M}) // (X_{0I} - X_{0M}) = \frac{X_{0I} \cdot X_{0I} - X_{0M}^2}{X_{0I} + X_{0I} - 2X_{0M}} \quad (1)$$

当 $X_{0I} = X_{0I}$ 时, (1)式可得:

$$X'_{i,j0} = \frac{1}{2} (X_{0I} + X_{0M}) \quad (2)$$

(2)一回挂检运行时

如图1所示,当第II回线挂检,此时i-j两节点间的等值阻抗为:

$$X_{i,j0} = X_{0I} - X_{0M} + X_{0M} // (X_{0I} - X_{0M}) = \frac{X_{0I} X_{0I} - X_{0M}^2}{X_{0I}} \quad (3)$$

(3)一回互感线路断开时:

如图1所示,当II回线路断开退出运行时,不难求得i-j两节点之间的等值阻抗为:

$$X_{i,j0} = X_{0I} \quad (4)$$

(4)结果分析比较

i) 挂检与正常比较

由(3)式减(1)式得:

$$X_{0差} = \frac{X_{0I} - 2X_{0M}}{X_{0I}(X_{0I} + X_{0I} - 2X_{0M})} (X_{0I} X_{0I} - X_{0M}^2) \quad (5)$$

从(5)式可知,当 $X_{0I} = 2X_{0M}$ 时,正常运行和挂检对系统的影响是一致的,这时,挂检对系统几乎无影响。当 $X_{0I} > 2X_{0M}$ 时,挂检对系统零序网络的影响要小些。当 $X_{0I} < 2X_{0M}$ 时,挂检要比正常严重些。

从以上分析可有如下结论:当双回共端线路架设设计时,应尽可能使其互感的比例占用线路自阻抗百分五十,这样对系统影响最小。

ii) 挂检与断开比较

由(4)式减(3)式得:

$$X_{0差} = \frac{X_{0M}^2}{X_{0I}} \quad (6)$$

iii) 断开与正常比较

(4)式减(1)式得:

$$X_{0差} = \frac{(X_{0I} - X_{0M})^2}{X_{0I} + X_{0I} - 2X_{0M}} \quad (7)$$

从(6)和(7)式可知:挂检要比断开一回对系统的影响大些,断开要比正常对系统的影响小些。

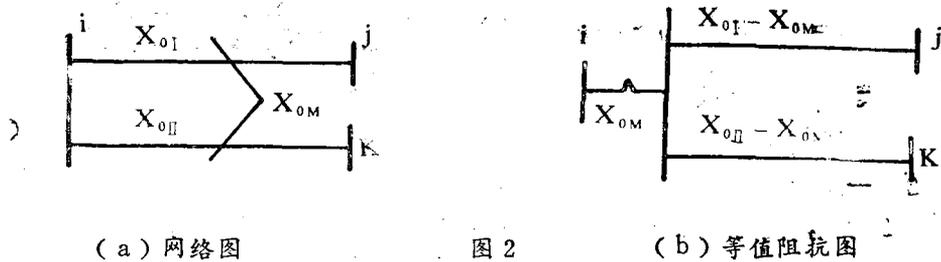
2. 非双端共端线路:

当II回线挂检时i-j之间的等值阻抗为:

$$X_{i,j0} = \frac{X_{0I} \cdot X_{0I} - X_{0M}^2}{X_{0I}} \quad (8)$$

当II回断开时,i-j之间的等值阻抗为:

$$X_{i,j0} = X_{0I} \quad (9)$$



(a) 网络图

图 2

(b) 等值阻抗图

从(8)式和(9)与(3)和(4)比较知,非共端互感线路与共端互感线路有相同结论。

(二) 零序电流保护整定计算中的问题

根据以上分析,零序电流保护整定计算不可避免地要遇到零序互感耦合的问题,正确判别其影响是有必要的,也是很有效的。根据上节的推导和分析,在实际整定计算中不难得到正确的判断,选择合理的保护方案。

针对零序互感耦合问题,在零序电流保护整定计算中应注意如下问题:

1. 分支系数计算时,与被保护线路有互感耦合的线路应尽可能考虑其挂地线检修,与被配合线路有互感的线路可以不考虑挂检。
2. 当保护要与相邻出线的纵差保护(例如高频保护)配合时,与保护线路或被配合线路有互感耦合的线路应考虑挂检。
3. 校验零序电流保护灵敏度时,与保护线路有互感的线路断开退出运行要比挂检灵敏度差。

三 一组互感耦合线路中一条线路挂检一条线路中间故障的数学模型

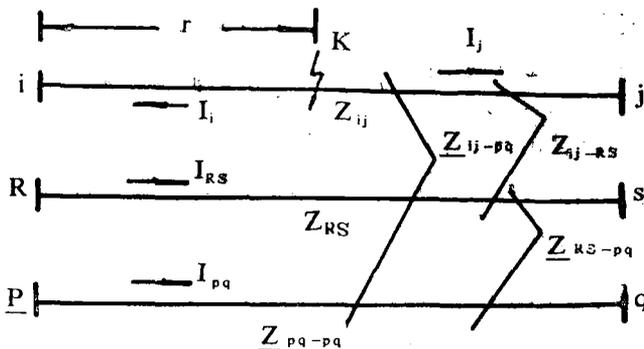


图 3

如图 3 所示是一组有零序互感耦合的线路,其中 Z_{ij} 和 Z_{rs} 分别为线路*i-j*和 *R-S*

的自阻抗; Z_{ij-RS} 为 $i-j$ 线路与 R-S 线路之间的互感耦合阻抗; Z_{ii-Pq} 和 Z_{RS-Pq} 分别为线路 ij 和 RS 与 $p-q$ 之间互感耦合阻抗矩阵; Z_{Pq-Pq} 为 $P-q$ 线路组的自阻抗矩阵。

在阻抗图中凡是有下横线的均是矩阵形式, 没有横线是阻抗元素。

假定如图 3 中线路 R-S 挂地线检修, $i-j$ 线路中间某点发生接地故障, 则有如下方程:

$$\begin{cases} u_i - u_k = -rZ_{ij}I_i + rZ_{ij-RS}I_{RS} + rZ_{Pq-ij}I_{Pq} \\ -u_j + u_k = (1-r)Z_{ij}I_j + (1-r)Z_{ij-RS}I_{RS} + (1-r)Z_{Pq-ij}I_{Pq} \\ u_R - u_S = -rZ_{ij-RS}I_i + (1-r)Z_{ij-RS}I_j + Z_{RS}I_{RS} + Z_{Pq-RS}I_{Pq} \\ u_P - u_q = -rZ_{ij-Pq}I_i + (1-r)Z_{ij-Pq}I_j + Z_{RS-Pq}I_{RS} + Z_{Pq-Pq}I_{Pq} \\ I_i + I_j = I_k \end{cases} \quad (10)$$

因为 R-S 线路挂检, 所以 $u_R - u_S = 0$, 把 (10) 方程组中的前两式相加并整理得:

$$\begin{cases} u_i - u_j = Z_{ij}[-rI_i + (1-r)I_j] + Z_{ij-RS}I_{RS} + Z_{Pq-ij}I_{Pq} \\ 0 = Z_{ij-RS}[-rI_i + (1-r)I_j] + Z_{RS}I_{RS} + Z_{Pq-RS}I_{Pq} \\ u_P - u_q = Z_{ij-Pq}[-rI_i + (1-r)I_j] + Z_{RS-Pq}I_{RS} + Z_{Pq-Pq}I_{Pq} \\ I_i + I_j = I_k \end{cases} \quad (11)$$

把 (11) 式写成矩阵方程形式:

$$\begin{bmatrix} u_{ij} \\ 0 \\ u_{Pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ij} & Z_{ij-RS} & Z_{Pq-ij} \\ Z_{ij-RS} & Z_{RS} & Z_{Pq-RS} \\ Z_{ij-Pq} & Z_{RS-Pq} & Z_{Pq-Pq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -rI_i + (1-r)I_j \\ I_{RS} \\ I_{Pq} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\text{或 } \underline{U} = [\underline{Z}] \underline{I} \quad (13)$$

将 (12) 式中的阻抗阵求逆得如下方程:

$$\begin{bmatrix} -rI_i + (1-r)I_j \\ I_{RS} \\ I_{Pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ij} & Y_{ij-RS} & Y_{Pq-ij} \\ Y_{ij-RS} & Y_{RS} & Y_{Pq-RS} \\ Y_{ij-Pq} & Y_{RS-Pq} & Y_{Pq-Pq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ij} \\ 0 \\ u_{Pq} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\text{令: } I_{ij-ij} = Y_{ij}u_{ij} + Y_{Pq-ij}u_{Pq} \quad (15)$$

$$\text{可求得: } \begin{cases} I_i = -I_{ij-ij} + (1-r)I_k \\ I_j = I_{ij-ij} + rI_k \end{cases} \quad (16)$$

这样就求得了一组多回互感耦合线路一回挂检后另一回中间发生接地故障的数学模型。同时不难求得其它互感线路的零序电流。

四 零序互感耦合对接地距离保护的影响分析及采取措施的设想

接地距离保护是目前电力系统采用的主要接地保护之一, 在有零序互感耦合的线路

上采用接地距离保护能否正确反映接地距离呢？有没有办法解决呢？这将是本文主要课题之一。

(一) 有零序互感耦合线路接地距离的数学模型

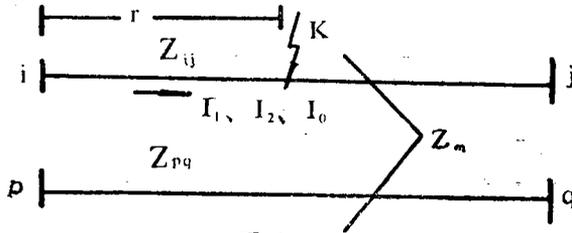


图 4

如图 4 所示，当 K 点发生接地故障时，有如下方程：

$$u_{i\phi} = u_1 + u_2 + u_0 = [I_1 z_{i11} + I_2 z_{i12} + I_0 z_{i10} + I_{Pq0} z_K] i \quad (17)$$

对于输电线路来说，正负序参数基本上相同，故令 $z_{i11} = z_{i12}$ ，有下式：

$$u_i = (I_1 + I_2 + I_0) r z_{i11} + \frac{z_{i10} - z_{i11}}{3z_{i11}} r z_{i11} 3I_0 + \frac{z_M}{3z_{i11}} 3I_{Pq} r z_{i11} \quad (18)$$

$$\text{令 } k = \frac{z_{i10} - z_{i11}}{3z_{i11}}, \quad k' = \frac{z_M}{3z_{i11}}$$

这样，(18) 式可写为：

$$u_i = (I_\phi + k3I_0 + k'3I_{Pq0}) r z_{i11} \quad (19)$$

从 (19) 式可知，与正常无零序互感耦合线路比较，多了一项 $k'3I_{Pq0}$ ，由于 I_{Pq0} 的方向可能随接地故障点的变化而改变，这必将使其测量有较大的误差，保护有可能失去选择性，或者在保护区内有拒动的可能性。

(二) 有互感线路采用接地距离保护的互感补偿措施设想

从上节分析可知，如果在接地距离保护中引入另一回与其有互感耦合线路的零序电流进行补偿，就消除零序互感耦合对接地距离保护的影响。对于双端共端互感线路来说，这是不难实现的，对一端共端的互感耦合线路，共端侧采用接地距离也容易采用互感补偿。对于两端均不共端的互感线路，或一端共端互感线路不共端侧，采用零序互感补偿就有一定的困难，这主要是另一回线路的零序电流较难获得的原因。

从 (19) 式中不难看出，只要接地距离保护中按极性接入另一回与其有互感线路的零序电流即可。这样不论另一回线路零序电流的方向如何都可以得到正确的补偿，这样补偿后，不论是采用方向阻抗继电器作为测量元件或者采用多相补偿继电器都可以改善其动作特性。

(三) 同杆并架双回线接地距离保护的分析和实际举例

上节 (19) 式是对一般互感线路的推导结果，对于同杆并架线路也是适用的。对于图 5 所示的双端共端线路来说，(19) 式可写为：

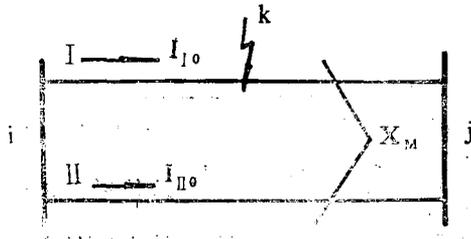


图 5

$$u_\phi = (I_\phi + k3I_{I0} + k'3I_{II0}) r_{z_{I1}} \quad (20)$$

如图 5 所示，当接地故障点 k 沿第 I 回线移动时，II 回线的方向将发生改变。其中必有一点存在，这点发生接地故障时，第 II 回线的零序电流为零，我们不妨称该点为 \$k_1\$ 点，当故障点在 \$k_1\$ 点右侧时，\$3I_{I0}\$ 的方向为正，如果本故障线路不采取互感

补偿措施，则测量阻抗将大于实际阻抗；当故障点在 \$k_1\$ 点左侧时，\$3I_{I0}\$ 的方向为负，如果本线接地距离不采取互感补偿措施，接地距离的测量阻抗将小于实际阻抗。这样，有互感耦合的线路采用接地距离，其测量阻抗不能精细地反映实际阻抗。

如图 5 所示，当第 II 回线挂地线检修时，接地故障点沿第 I 回线移动，挂检线路的零序电流方向也将发生变化。同样存在一点，这点发生接地故障时，挂地线检修线路的零序电流为零。这点右侧故障时，挂检线路的零序电流为负，这必将使得接地距离的测量阻抗小于实际阻抗，有可能使保护无选择动作。当在 \$k_1\$ 点左边故障时，挂检线路的零序电流为正，接地距离的测量阻抗大于实际阻抗。

如果在接地距离保护中加入零序互感补偿，其测量阻抗能较精确地反映实际阻抗。实际举例：

以湖北系统凤关 I/II 回为例采用接地距离进行分析计算，参数如图 5 所示：

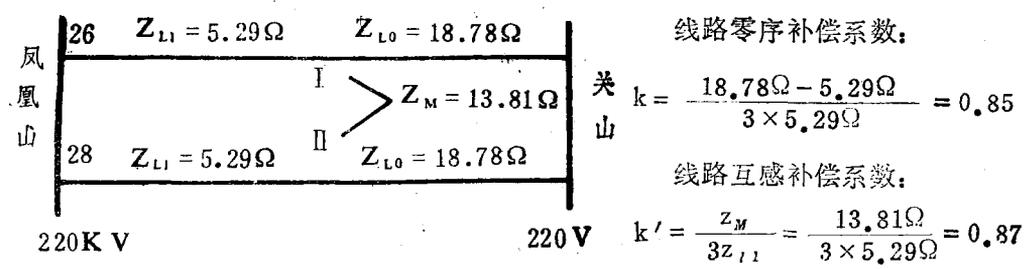


图 6

表 1、2 列出沿 I 回线发生单相接地故障，凤凰山侧故障线路和非故障线路的零序电流；故障相电压，采用或不采用零序互感补偿的测量阻抗值，以及实际阻抗值等等。表 1 列出的是两回均正常运行的情况；表 2 列出第 II 回线挂地线检修的情况；

从表 1、表 2 可以看出，互感耦合对接地距离保护有较大的影响。正常双回线运行时，靠近第 I 段末端附近故障时，因测量阻抗大于实际阻抗而不动作；当有一回挂检时，线末故障时有可能使保护无选择动作。同时可以看出，当采用互感补偿以后，接地距离保护基本上能精确反映实际情况。

对于多相补偿接地距离保护来说，互感耦合对其也有一定的影响，这里不进行详细分析，这种类型的接地距离保护，也可以采取类似的补偿措施，这里不赘叙。



表 1

项目 \ 故障点	1%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
线路 I: $3I_{10}$ (A)	83.80	70.417	59.118	50.262	43.042	36.947	31.632	26.846	22.391	18.096	13.789
故障相电压 (V)	0.01469	0.12524	0.21427	0.27938	0.32757	0.36307	0.38842	0.40517	0.41408	0.41529	0.4083
故障相电流 (A)	81.06	68.529	57.984	49.76	43.098	37.519	32.704	28.422	24.495	20.773	17.113
线路 II: $3I_{10}$ (A)	-6.22	-3.6144	-1.264	0.73857	2.54	4.24	5.915	7.633	9.463	11.482	13.789
无互感补偿测 量阻抗 (Ω)	0.051	0.516	1.047	1.598	2.175	2.737	3.442	4.183	5.032	6.076	7.49
有互感补偿测 量阻抗 (Ω)	0.053	0.529	1.058	1.587	2.116	2.645	3.174	3.703	4.232	4.761	5.29
实际阻抗 (Ω)	0.053	0.529	1.058	1.587	2.116	2.645	3.174	3.703	4.232	4.761	5.29

注: 1、电流、电压均为标么值, 基准容量为100MVA, 基准电压为: 230kV, 阻抗为有名值。

2、均计算凤凰山侧保护

表 2

项目 \ 故障点	1%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
线路 I: $3I_{10}$ (A)	74.002	64.722	57.12	51.414	47.028	43.609	40.933	38.857	37.291	36.189	35.538
故障相电压 (V)	0.01463	0.1247	0.21326	0.27793	0.32567	0.36066	0.38544	0.40149	0.40954	0.40964	0.40116
故障相电流 (A)	73.266	63.805	56.021	50.144	45.586	41.987	39.118	36.828	35.019	33.632	32.64
挂检线路 II: $3I_{10}$ (A)	11.62	6.756	2.3653	-1.383	-4.7615	-7.9576	-11.12	-14.368	-17.844	-21.698	-26.13
无互感补偿测 量阻抗 (Ω)	0.0568	0.555	1.079	1.567	2.014	2.413	2.758	3.04	3.223	3.365	3.38
有互感补偿测 量阻抗 (Ω)	0.0529	0.529	1.058	1.587	2.116	2.645	3.174	3.703	4.232	4.761	5.29
实际阻抗 (Ω)	0.0529	0.529	1.058	1.587	2.116	2.645	3.174	3.703	4.232	4.761	5.29

注: 1、电流、电压均为标么值、基准容量100MVA, 基准电压为230kV, 阻抗为有名值。

2、电压、电流均为凤凰山侧

参考文献

1. 《电力系统计算机分析计算中有关零序互感的分析研究》 王广学 《继电器》 1986年 4
2. 《电力系统接地故障点的分析计算方法》 王广学 《电力系统自动化》 1986.4