

# 继电保护计算分析用模拟网络的简化

华东电力设计院 俞鸣元

## 前 言

高压输电线路继电保护的動作性能往往与系统参数，如线路——电源阻抗比，各序相序阻抗的差别等数值有关，因此需要结合具体的电力系统来进行计算分析，并且总是希望能尽量与实际情况相符合。但是，为了便于比较电源阻抗与电势角度变化等因素对继电保护的影响，又希望针对双侧电源模拟网络来进行分析（参考文献〔1〕，〔2〕，〔3〕）。这两种要求似乎是相互矛盾的。

目前，华东电网普遍使用的电力系统稳定计算程序能针对较完整的网络结线进行计算，并能计及变压器抽头、变电所负荷、等等因素的影响，经过多年的实际使用，其模拟的实用价值与精确程度已得到较普遍的承认。本报告介绍了根据稳定计算的中间结果来计算双侧电源模拟网络的等值阻抗的方法。所谓等值是指针对被保护线路上的故障，线路两侧的短路电流与母线电压在两种情况下是一致的。因此，按照本报告所述方法求得的等值阻抗来计算继电保护的動作性能可协调上述矛盾，并可简化继电保护的 计算 程序，压缩计算时间。

### 一、原型网络与等值网络

对于一个复杂的多电源网络，只要所计算的短路故障是在被保护的线路上，且所需要得到的计算结果也仅仅是被保护线路上的短路电流与残余电压，则图1(a)所示的原型网络总是可用图1(b)的等值网络来代替。图中， $Z_L$ 是被保护线路的阻抗。原型网络除了被保护线路以外的部份均包含在虚线框内，未具体示出。各个等值阻抗与电气量均包括正序、负序与零序三个分量。

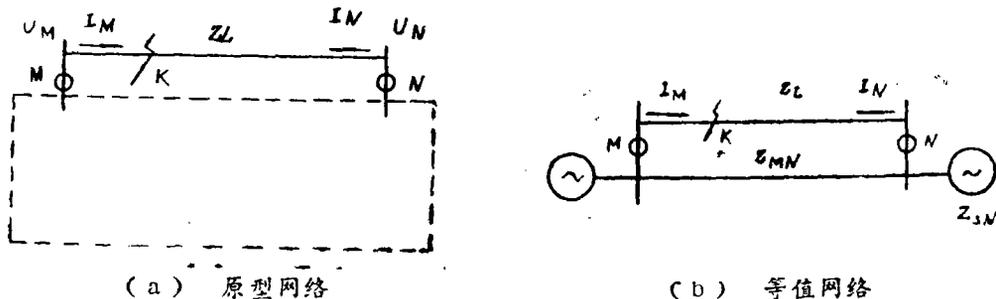
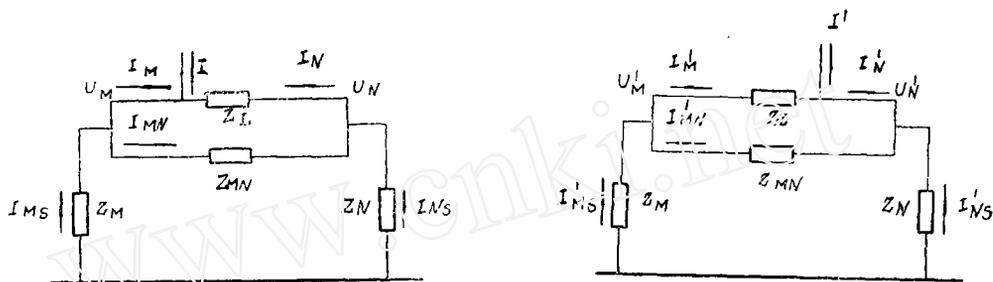


图 1

## 二、从短路故障的电流，电压计算等值阻抗

目前普遍使用的稳定计算程序能比较完整、真实地模拟电力系统，可计及变压器抽头、变电所负荷、等等因素的影响，根据稳定计算的中间结果所求得等值阻抗应能比较确切地符合电力系统的实际情况。

稳定计算程序会输出故障瞬间故障线路两侧各相序的短路电流与母线电压。在图 1 (b) 的基础上补充各支路的电流绘成图 2 (a) 与 2 (b)，据以计算等值阻抗。



(a) M侧出口短路，电流、电压分布图 (b) N侧出口短路，电流、电压分布图

图 2

从图 2 (a) 列出：

$$I_{Ms} = -\frac{U_M}{Z_M} = I_M + \frac{U_M - U_N}{Z_{MN}} \quad (1)$$

$$I_{Ns} = -\frac{U_N}{Z_N} = I_N - \frac{U_M - U_N}{Z_{MN}} \quad (2)$$

从图 2 (b) 列出：

$$I'_{Ms} = -\frac{U'_M}{Z_M} = I'_M + \frac{U'_M - U'_N}{Z_{MN}} \quad (3)$$

$$I'_{Ns} = -\frac{U'_N}{Z_N} = I'_N - \frac{U'_M - U'_N}{Z_{MN}} \quad (4)$$

从①，②，③，④得出：

$$Z_{MN} = \frac{(U'_M - U'_N)U_M - (U_M - U_N)U'_M}{I_M U'_M - I'_M U_M} \quad (5)$$

$$= \frac{(U_M - U_N)U'_N - (U'_M - U'_N)U_N}{I_N U'_N - I'_N U_N} \quad (5')$$

$$Z_M = -\frac{U_M}{I_M + \frac{U_M - U_N}{Z_{MN}}} = -\frac{U'_M}{I'_M + \frac{U'_M - U'_N}{Z_{MN}}} \quad (6), (6')$$

$$Z_N = -\frac{U_N}{I_N - \frac{U_M - U_N}{Z_{MN}}} = -\frac{U'_N}{I'_N - \frac{U'_M - U'_N}{Z_{MN}}} \quad (7), (7')$$

从⑤, ⑥, ⑦三式可算出图1(b)中的各个等值阻抗。⑤', ⑥', ⑦' 三式可用于校验。

上述三式可用于计算负序阻抗, 零序阻抗以及不考虑故障前线路输送功率的正序阻抗。对于正序网络, 需考虑故障前线路输送功率的影响, 稳定计算程序会在故障计算前输出功率分布计算(俗称潮流计算)的结果。将其有关部份示于图3。

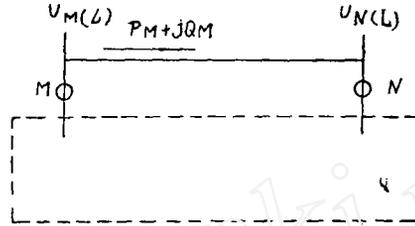


图3 功率分布计算所得出的线路输送功率

从  $P_M + jQ_M$  与  $U_M(L)$  可算得故障前的负荷电流  $I_L$ 。由于略去了线路电容, 全线的负荷电流是一致的。

稳定计算程序进行故障计算所得出的相当于图2(a), 图2(b)所示的电流、电压, 对于正序分量实际上包含了负荷分量。而上述的等值阻抗计算仅涉及短路电流的故障分量。因此, 需要把故障分量从总的短路电流中分离出来。

$$I_{1M}(K) = I_{1M}(K+L) - I_L \quad (8)$$

$$I_{1N}(K) = I_{1N}(K+L) + I_L \quad (9)$$

$$U_{1M}(K) = U_{1M}(K+L) - U_M(L) \quad (10)$$

$$U_{1N}(K) = U_{1N}(K+L) - U_N(L) \quad (11)$$

$$U_N(L) = U_M(L) - I_L Z_L \quad (12)$$

式中:  $I_{1M}(K) \dots U_{1M}(K) \dots$  等, 为M, N两侧短路电流与母线电压的故障分量。

$I_{1M}(K+L) \dots U_{1M}(K+L) \dots$  等, 为计及线路输送功率影响的M, N两侧短路电流与母线电压。

从⑧—⑫式所算得的  $I_{1M}(K)$ ,  $I_N(K)$ ,  $U_{1M}(K)$ ,  $U_{1N}(K)$  再结合N侧故障的类似数据, 应用⑤, ⑥, ⑦式可计算出计及线路输送功率的正序等值阻抗。

⑧—⑫式适用于线路上任何点的故障。

根据上述方法, 应用ALGOL—60算法语言编制了可在TQ—16型计算机上使用的计算程序。该程序除了输出等值阻抗的计算结果外, 还输出按⑤, ⑤'; ⑥, ⑥'; ⑦, ⑦' 两种算式所算出的两种结果的实数部份比值与虚数部份比值, 可据以大致判断输入计算的原始数据是否正确。输出的等值阻抗是两种结果的平均值。

### 三、归并举例与归并结果的回代验算

以华东电力系统环网中的奉化——宁波单回线路与宁波——镇海双回线路为例，介绍等值阻抗计算的情况。

稳定计算的网络有21个电源，74个节点。各参量系以100MVA的标么值表示。

1、奉化（M侧）——宁波（N侧）线路

$$Z_{1L} = 0.0067 + j0.0351$$

$$Z_{0L} = 0.029 + j0.114$$

功率分布计算结果：

$$U_M = 0.979 \angle 7.415^\circ$$

$$P_M = 0.111 + j0.189$$

$$\hat{I}_M = \frac{P_M}{U_M} = 0.2239 \angle 52.159^\circ$$

$$I_M = 0.2239 \angle -52.159^\circ$$

稳定计算的中间结果——故障瞬间的短路电流与母线电压，列于表1。

表1 奉化（M侧）——宁波（N侧）线路短路计算结果

		M 侧 参 数		N 侧 参 数	
		稳定计算结果	按归并阻抗计算	稳定计算结果	按归并阻抗计算
M 侧 出 口 单 相 接 地	I <sub>1</sub>	2.157 ∠ -69.424°	2.164 ∠ -69.409°	2.44 ∠ -70.145°	2.434 ∠ -70.099°
	I <sub>2</sub>	1.879 ∠ -67.441°	1.882 ∠ -67.349°	2.721 ∠ -71.441°	2.719 ∠ -71.452°
	I <sub>0</sub>	1.991 ∠ -68.965°	1.994 ∠ -68.924°	2.607 ∠ -70.449°	2.604 ∠ -70.425°
	U <sub>1</sub>	0.741 ∠ 9.819°	0.741 ∠ 9.812°	0.828 ∠ 9.749°	0.828 ∠ 9.736°
	U <sub>2</sub>	0.193 ∠ 191.10°	0.193 ∠ 191.045°	0.096 ∠ 194.48°	0.096 ∠ 194.387°
	U <sub>0</sub>	0.548 ∠ 189.38°	0.548 ∠ 189.378°	0.243 ∠ 194.54°	0.244 ∠ 194.505°
N 侧 出 口 单 相 接 地	I <sub>1</sub>	1.803 ∠ -75.593°	1.816 ∠ -75.379°	5.078 ∠ -69.416°	5.128 ∠ -69.339°
	I <sub>2</sub>	1.302 ∠ -66.087°	1.312 ∠ -65.874°	5.577 ∠ -72.188°	5.631 ∠ -72.092°
	I <sub>0</sub>	1.260 ∠ -65.375°	1.270 ∠ -65.198°	5.621 ∠ -72.301°	5.674 ∠ -72.195°
	U <sub>1</sub>	0.767 ∠ 11.883°	0.773 ∠ 11.992°	0.704 ∠ 12.603°	0.709 ∠ 12.738°
	U <sub>2</sub>	0.144 ∠ 193.15°	0.145 ∠ 193.244°	0.190 ∠ 193.14°	0.192 ∠ 193.263°
	U <sub>0</sub>	0.365 ∠ 193.30°	0.368 ∠ 193.362°	0.512 ∠ 192.46°	0.517 ∠ 192.544°

根据功率分布计算与稳定计算的中间结果，按照⑤—⑫式，应用TQ—16型计算机进行计算而得出的等值阻抗列于表2，计算中的偏差列于表3。

表2 奉化——宁波线路等值阻抗归并计算结果

$Z_{1M} = 0.04301 + j0.12507$	$Z_{1MN} = 0.04112 + j0.70609$	$Z_{1N} = 0.02485 + j0.04724$
$Z_{2M} = 0.02089 + j0.10513$	$Z_{2MN} = 0.45292 + j1.07393$	$Z_{2N} = 0.00270 + j0.03418$
$Z_{0M} = 0.05678 + j0.27742$	$Z_{0MN} = 1.82064 + j1.96364$	$Z_{0N} = 0.00829 + j0.09114$

注：从上述结果可见，在环网中 $Z_{MN}$ 与 $Z_L$ 之比甚大，一般可略去。

$$Z_{1MN}/Z_{1L} = 19.793 \angle 7.4739^\circ$$

$$Z_{2MN}/Z_{1L} = 32.617 \angle -12.06^\circ$$

$$Z_{0MN}/Z_{0L} = 44.946 \angle -5.8703^\circ$$

表 3 奉化——宁波线路等值阻抗比值 (⑤, ⑥, ⑦式与⑤', ⑥', ⑦'式的计算结果比值)

$R_{1M}/R'_{1M}$ = 0.9888	$X_{1M}/X'_{1M}$ = 1.0019	$R_{1MN}/R'_{1MN}$ = 0.2661	$X_{1MN}/X'_{1MN}$ = 1.0042	$R_{1N}/R'_{1N}$ = 0.9963	$X_{1N}/X'_{1N}$ = 1.0014
$R_{2M}/R'_{2M}$ = 0.9750	$X_{2M}/X'_{2M}$ = 1.0017	$R_{2MN}/R'_{2MN}$ = 0.7469	$X_{2MN}/X'_{2MN}$ = 1.0933	$R_{2N}/R'_{2N}$ = 0.9975	$X_{2N}/X'_{2N}$ = 1.0000
$R_{0M}/R'_{0M}$ = 0.9936	$X_{0M}/X'_{0M}$ = 1.0001	$R_{0MN}/R'_{0MN}$ = 0.8704	$X_{0MN}/X'_{0MN}$ = 1.0144	$R_{0N}/R'_{0N}$ = 0.9928	$X_{0N}/X'_{0N}$ = 0.9999

按归并阻抗进行故障计算的结果应与据以归并等值阻抗的稳定计算结果相等，但表 1 所列的两组数据略有出入。看来这是由于计算误差所引起的。尤其是稳定计算，可能运算复杂，误差较大。稳定计算中输入故障点位置的方式，可填成距 M 侧 K 处（线路长度的标么值）发生故障，也可填成距 N 侧（1-K）处发生故障，两者结果理应一致，但实际稍有出入，以奉化——宁波线路中点的单相接地故障为例，把两种结果并列于表 4 以作比较。

表 4 奉化——宁波线路中点单相接地故障，短路计算结果比较

		距 M 侧 0.5 $Z_L$ 处故障	距 N 侧 0.5 $Z_L$ 处故障
M 侧故障参数	$I_1$	3.281 $\angle$ -69.549°	3.279 $\angle$ -69.531°
	$I_2$	3.627 $\angle$ -71.499°	3.656 $\angle$ -71.79°
	$I_0$	3.587 $\angle$ -71.229°	3.595 $\angle$ -71.295°
	$U_1$	0.790 $\angle$ 10.449°	0.790 $\angle$ 10.441°
	$U_2$	0.126 $\angle$ 193.97°	0.126 $\angle$ 194.09°
	$U_0$	0.331 $\angle$ 193.57°	0.330 $\angle$ 193.62°
N 侧故障参数	$I_1$	1.906 $\angle$ -71.457°	1.905 $\angle$ -71.436°
	$I_2$	1.562 $\angle$ -67.349°	1.532 $\angle$ -66.510°
	$I_0$	1.601 $\angle$ -68.056°	1.591 $\angle$ -67.826°
	$U_1$	0.765 $\angle$ 10.390°	0.765 $\angle$ 10.381°
	$U_2$	0.163 $\angle$ 191.85°	0.163 $\angle$ 191.66°
	$U_0$	0.446 $\angle$ 190.54°	0.446 $\angle$ 190.49°

2. 宁波 (M侧) —— 镇海 (N侧) 双回线

$$Z_{1L} = 0.0036 + j0.0226$$

$$Z_{0L} = 0.01414 + j0.0554$$

功率分布计算结果:  $U_M = 0.972 \angle 7.255^\circ$

$$P_M = - (0.742 + 0.17)$$

$$\hat{I}_M = \frac{P_M}{U_M} = 0.78315 \angle -174.3506^\circ$$

$$I_M = -0.78315 \angle -5.6494^\circ$$

表 5 宁波 (M侧) —— 镇海 (N侧) 线路短路计算结果

	M 侧 参 数		N 侧 参 数		
	稳定计算结果	按归并阻抗计算	稳定计算结果	按归并阻抗计算	
M 侧 出 口 单 相 接 地	$I_1$	$4.976 \angle -80.426^\circ$	$5.056 \angle -80.62^\circ$	$2.127 \angle -48.535^\circ$	$2.125 \angle -47.988^\circ$
	$I_2$	$5.197 \angle -70.030^\circ$	$5.249 \angle -70.246^\circ$	$1.681 \angle -74.068^\circ$	$1.695 \angle -73.817^\circ$
	$I_0$	$4.883 \angle -69.618^\circ$	$4.931 \angle -69.78^\circ$	$1.996 \angle -74.439^\circ$	$2.015 \angle -74.392^\circ$
	$U_1$	$0.704 \angle 12.601^\circ$	$0.192 \angle 12.501^\circ$	$0.749 \angle 13.9^\circ$	$0.755 \angle 13.791^\circ$
	$U_2$	$0.190 \angle 193.17^\circ$	$0.709 \angle 193.026^\circ$	$0.152 \angle 194.75^\circ$	$0.154 \angle 194.511^\circ$
	$U_0$	$0.512 \angle 192.44^\circ$	$0.517 \angle 192.806^\circ$	$0.401 \angle 195.6^\circ$	$0.405 \angle 195.425^\circ$
	N 侧 出 口 单 相 接 地	$I_1$	$1.637 \angle 255.4^\circ$	$1.611 \angle 255.119^\circ$	$6.053 \angle -62.552^\circ$
$I_2$		$1.555 \angle -68.08^\circ$	$1.540 \angle -68.738^\circ$	$5.8 \angle -71.947^\circ$	$5.818 \angle -72.845^\circ$
$I_0$		$1.233 \angle -63.939^\circ$	$1.232 \angle -64.943^\circ$	$6.131 \angle -72.573^\circ$	$6.133 \angle -73.397^\circ$
$U_1$		$0.728 \angle 12.942^\circ$	$0.726 \angle 12.058^\circ$	$0.699 \angle 14.734^\circ$	$0.697 \angle 13.839^\circ$
$U_2$		$0.163 \angle 194.62^\circ$	$0.163 \angle 193.642^\circ$	$0.198 \angle 194.31^\circ$	$0.198 \angle 193.388^\circ$
$U_0$		$0.429 \angle 195.47^\circ$	$0.429 \angle 194.557^\circ$	$0.499 \angle 194.96^\circ$	$0.499 \angle 194.018^\circ$

表 6 宁波 —— 镇海线路等值阻抗归并计算结果

$Z_{1M} = 0.02840 + j0.07141$	$Z_{1MN} = 0.00291 + j0.02219$	$Z_{1N} = 0.03899 + j0.06307$
$Z_{2M} = 0.00745 + j0.05294$	$Z_{2MN} = 0.004 + j0.02306$	$Z_{2N} = 0.00165 + j0.04581$
$Z_{0M} = 0.03257 + j0.17205$	$Z_{0MN} = 0.01477 + j0.05606$	$Z_{0N} = 0.00071 + j0.10107$

注: 从上述结果可见, 对于双回线  $Z_{MN}$  与  $Z_L$  之比接近于 1。

$$Z_{1MN}/Z_{1L} = 0.9779 \angle 1.5796^\circ$$

$$Z_{2MN}/Z_{1L} = 1.0227 \angle -0.7899^\circ$$

$$Z_{0MN}/Z_{0L} = 1.0139 \angle -0.442^\circ$$

表7 宁波——镇海线路等值阻抗比值(⑤, ⑥, ⑦式与⑤', ⑥', ⑦'式的计算结果比值)

$R_{1M}/R'_{1M}$ = 1.033	$X_{1M}/X'_{1M}$ = 1.0112	$R_{1MN}/R'_{1MN}$ = 1.1776	$X_{1MN}/X'_{1MN}$ = 1.0269	$R_{1N}/R'_{1N}$ = 1.0282	$X_{1N}/X'_{1N}$ = 1.0066
$R_{2M}/R'_{2M}$ = 1.0129	$X_{2M}/X'_{2M}$ = 0.9953	$R_{2MN}/R'_{2MN}$ = 1.0217	$X_{2MN}/X'_{2MN}$ = 0.99	$R_{2N}/R'_{2N}$ = 1.0656	$X_{2N}/X'_{2N}$ = 0.9962
$R_{0M}/R'_{0M}$ = 1.0021	$X_{0M}/X'_{0M}$ = 0.9998	$R_{0MN}/R'_{0MN}$ = 1.0026	$X_{0MN}/X'_{0MN}$ = 0.9996	$R_{0N}/R'_{0N}$ = 1.0405	$X_{0N}/X'_{0N}$ = 0.9999

表8 宁波——镇海线路中点单相接地故障, 短路计算结果比较

		距M侧 $0.5Z_L$ 处故障	距N侧 $0.5Z_L$ 处故障
M侧故障参数	$I_1$	$2.981 \angle -86.401^\circ$	$2.992 \angle -87.39^\circ$
	$I_2$	$3.097 \angle -68.788^\circ$	$3.145 \angle -69.881^\circ$
	$I_0$	$2.819 \angle -67.915^\circ$	$2.84 \angle -68.622^\circ$
	$U_1$	$0.738 \angle 12.522^\circ$	$0.739 \angle 12.08^\circ$
	$U_2$	$0.161 \angle 194.26^\circ$	$0.161 \angle 193.97^\circ$
	$U_0$	$0.429 \angle 194.24^\circ$	$0.428 \angle 193.85^\circ$
N侧故障参数	$I_1$	$3.674 \angle -57.78^\circ$	$3.682 \angle -57.776^\circ$
	$I_2$	$3.357 \angle -72.214^\circ$	$3.312 \angle -72.107^\circ$
	$I_0$	$3.637 \angle -72.628^\circ$	$3.619 \angle -72.907^\circ$
	$U_1$	$0.747 \angle 13.95^\circ$	$0.748 \angle 13.537^\circ$
	$U_2$	$0.158 \angle 195.12^\circ$	$0.159 \angle 194.53^\circ$
	$U_0$	$0.407 \angle 195.8^\circ$	$0.408 \angle 195.3^\circ$

### 参 考 文 献

- 1、阻抗继电器动作特性的数字计算  
华东电力设计院 82年3月
- 2、单相重合闸选相元件误动事故计算  
华东电力设计院 82年4月
- 3、上海地区220千伏线路, 部份阻抗继电器动作特性分析  
华东电力设计院 82年4月