运用故障线路两侧电流比值或电压比值来判断故障点的方法

湖南省电力中心调度所　黄汉诚

本文提出和论证了运用故障线路两侧电流比值或电压比值判断故障点的方法——“电流比值法”和“电压比值法”。该方法，作为接地故障点的判断，具有与系统开机方式及负荷无关，与故障类型及故障点是否经过渡阻抗无关的特点；与运用一侧电流来判断故障点的方法相比较，其供使用的曲线条数少，且绘制简便，精度高。若从判断线路故障点这一要求来看，采用“电压比值法”可以大为减少系统中故障录波装置和其录波量的数目。

电力系统中的电气短路故障，约有90%发生在架空线路上；由于架空线路处于野外，伸延十乃至数百公里，其所经地域中，有些地段的地形复杂交通十分不便；若要在全线范围内寻找短路故障点，将是一件费工费时的苦差。若短路故障点找不到，轻则给系统留下隐患；重则拖长了线路停运时间，给系统电力生产立即造成损失。因此，迅速寻找、排除线路故障是电力生产中一个急需解决的问题。当前国内各电力系统中普遍装设了故障录波装置，正确运用它所提供的信息，准确有效的判断故障范围，不但可以减少故障时巡线工作量，而且是迅速寻找，排除线路故障的关键。本文从电路的基本原理出发，探求一种适用的故障信息，较为科学地判断短路故障点的方法。

目前，国内流行的是运用故障线路一侧的零序电流数值大小，来判断接地故障点的方法——不妨称其为“电流法”；该法存在如下的一些问题：其一，供使用的短路电流曲线是按计算值绘制的；通常的短路电流计算（尤其是作为保护整定计算使用的短路计算）是忽略了系统中电源电势间的差别和负荷的。在较大的系统中，尤其是具有重负荷远距离输电的系统中，送端电厂与负荷中心附近电厂的电源电势间相位有较大的差（40°也不罕见）；负荷中心区附近的等值负荷阻抗和该处不计负荷时的等值电源阻抗可能为同一数量级；从而使得实际故障电流和计算值有着不小的偏差。其二，通常短路故障是经过电弧及其它过渡阻抗的，而短路计算是以金属性短路为条件进行的，这势必使故障电流的计算值与实际数值有所差别。以上两点使得用“电流法”来判断故障点，在

精度上成了问题；据说，有些系统用此法判断故障点的精度曾经有过一档线的纪录，看来这种偶然巧合的机会是不多的。另外，系统的开机方式和负荷是多变的（国内有些系统负荷的峰谷差达$^1/_3$），要求给出所有方式下的短路电流曲线是不可能的；这样，故障时就不得不采用相近方式下的短路电流曲线来判断故障点，从而就更恶化了判断精度。

探求开机方式、负荷以及经否过渡阻抗的故障，对故障点判断的无影响的方法，是本文讨论的中心。

顺便提一下，由于线路所经地段的地形、地质，以及线路各基杆（塔）型、布线等不完全相同，从而线路各段单位长度的电气参数也不相同——即非"均匀"的；即使全换位的线路，而故障点不会总发生在全换位点上；从而各序网络间仍存在互感效应。线路的非"均匀"性这一事实，以及电力系统中非线性元件（如三相式变压器等）的存在，使得故障点位置的判定（即使测量系统是无偏差的）也不可能达到"无差"的精度。

下述讨论的前提是：（1）系统中元件是线性的，且可运用"对称分量法"。（2）所讨论的故障线路是"均匀"的。（3）稳态工况。

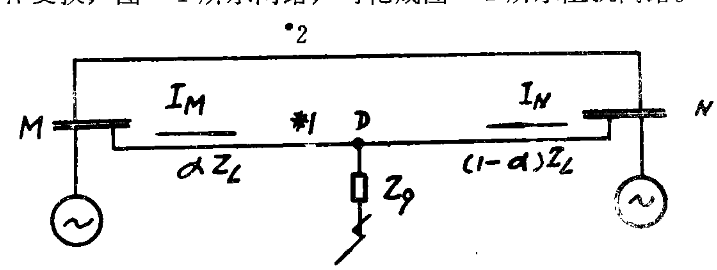
由电路的基本理论可得出，在网络两节点M、N之间任一支路上任何一点D支接任意负荷（过渡）阻抗Z_g时，由M、N流至D点电流的比值，或M、N节点电压的比值是与支接阻抗Z_g无关的量；而且是M至D与N至D间阻抗比值的单值函数。运用电路的这一基本特征，提出了用故障线路两侧电流比值来判定故障点位置的"电流比值法"；和用故障线路两端母线电压比值来判定故障点位置的"电压比值法"

一、"电流比值法"

1. 故障线路与系统其它元件无互感时。

对于一个实际系统，一般总可以将其简化成图一 *1* 所示的情况。图一 *1* 中M、N间的联络线^{*1}为被讨论的故障线路；线路^{*2}为等值的联络线。线路^{*1}与^{*2}等间无互感效应；M、N两侧的电源均为具有内阻抗Z_M'、Z_N'的电压源。Z_g为故障所经的过渡阻抗。

通过△—人变换，图一 *1* 所示网络，可化成图一 2 所示阻抗网络。



图一*1*　简化后的一般系统

由图一 2，取回路 0—M—D—N—0，依KCV定律有：

$$I_M(Z_M+Z_L\alpha)-I_N[Z_N+Z_L(1-\alpha)] \quad \cdots\cdots(1)$$

式（1）整理后得：

$$\alpha=\frac{A}{1+I}-B \qquad \cdots\cdots(2)$$

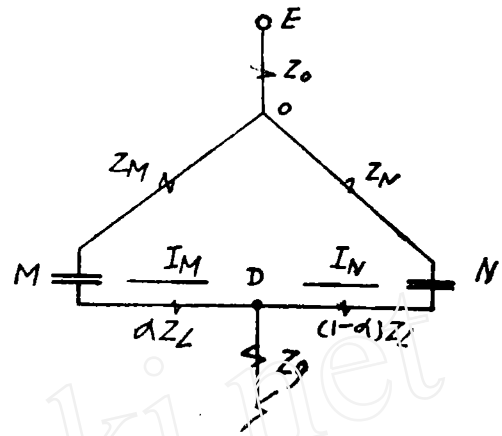
式中：

$$\left.\begin{aligned} I&=\frac{I_M}{I_N}\\ A&=\frac{Z_M+Z_N}{Z_L}+1\\ B&=\frac{Z_M}{Z_L}\end{aligned}\right\} \qquad \cdots\cdots(3)$$

对于给定的运行方式下，A、B为定常数。

由式（2）、（3）不难得出如下结论：

（1）对于短路故障，运用"电流比值法"判断故障点位置，与故障所经过渡阻抗Z_g无关。



图—2　图—1所示系统经△—人变换后的等值网络

（2）对于不对称接地短路，运用两侧零电流比值来判断故障点位置，与系统开机方式、负荷大小，以及故障类型（两相或单相）无关。

鉴于系统中零序网络在运行中变化不多，故"电流比值法"作为接地短路故障点的判断方法，其优点更为突出。

在直角座标纸上，依式（2）、（3）绘出曲线$\alpha=f(I)$以供使用。该曲线的绘制也十分简便，它无需将线路分成若干段逐点进行短路计算，而只需运用短路计算中M、N点短路时的电流值，就可以定出常数A、B来，依式（2）去绘制曲线。

若已知：M点短路时$I=I'$，N点短路时$I=I''$；

则由式（2）有：

$$\left.\begin{aligned}\frac{A}{1+I'}-B&=0\\ \frac{A}{1+I''}-B&=1\end{aligned}\right\} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

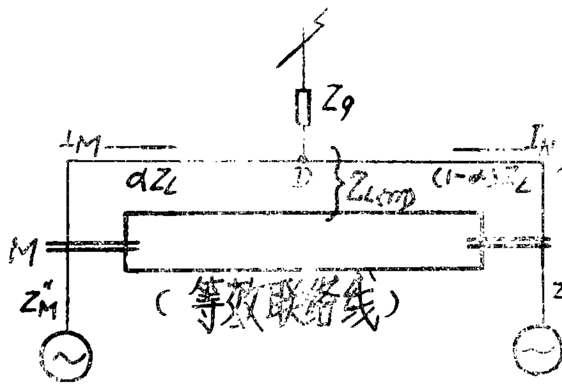
解方程组（4）得：

$$\left.\begin{aligned} B&=\frac{1+I''}{I'-I''}\\ A&=\frac{(1+I')(1+I'')}{I'-I''}=(1+I')B\end{aligned}\right\} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

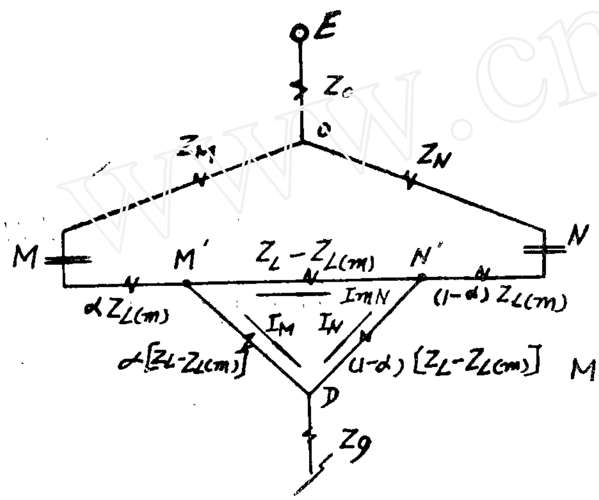
2. 故障线路为具有互感的双回线之一时。

以下只对两回线的单位长度阻抗、线路长度相同的情况，予以讨论。

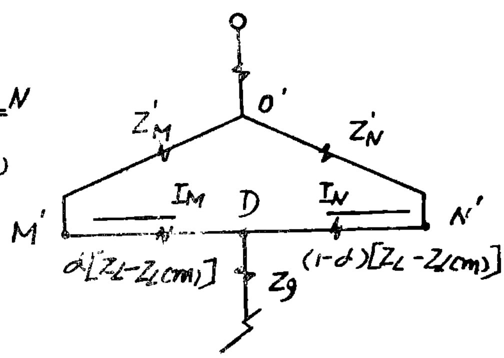
所讨论的系统简化后如图—3所示，故障发生在双回线之一的D点，且为经过过渡阻抗Z_g的短路。每回线的自阻抗为Z_L，两回线间的互阻抗为$Z_{L(m)}$。由△—人变换及双回具有互感的线路等值网络，不难得到图—4和图—5所示的等值网络。（将图—3中电源支路和等值联络线构成△，化成人得图—4；将图—4 $M'N'O$△化成人，则得图



图—3　具有双回线的等值系统



图—4　图—3中系统的等值网络



图—5　简化后的图—3中系统等值网络

—５）图—５中：

$$\left.\begin{aligned} Z_M' &= \frac{[Z_M+\alpha Z_{L(m)}]\,[Z_L-Z_{L(m)}]}{Z_M+Z_N+Z_L} \\ Z_N' &= \frac{[Z_N+(1-\alpha)Z_{L(m)}]\,[Z_L-Z_{L(m)}]}{Z_M+Z_N+Z_L} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots (6)$$

由图—５取回路M'—D—N'—$0'$—M'，依KCV定律得：

$$I_M\{\alpha[Z_L-Z_{L(m)}]+Z_M'\}-I_N\{(1-\alpha)[Z_L-Z_{L(m)}]+Z_N'\}=0 \quad \cdots\cdots (7)$$

将式（６）代入式（７）中，整理后得：

$$\alpha=\frac{A}{1+I}-B \quad \cdots\cdots (8)$$

式中：

$$I=\frac{I_M}{I_N}$$

$$A=\frac{Z_M+Z_N}{Z_M+Z_N+Z_L+Z_{L(m)}}+1 \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(9)$$

$$B=\frac{Z_M}{Z_M+Z_N+Z_L+Z_{L(m)}}$$

因式（8）和式（2）具有完全相同的形式，故其常数A、B的确定式也相同——同于式（5）。

“电流比值法”虽然比“电流法”科学、精确，但，它要用两侧电流量，若发生一侧漏录时，则该法失效。考虑到一般电站中，常常具有两套或两套以上的录波装置，若运用故障时母线电压来判断故障点位置，则可以在很大程度上避免漏录。

二、“电压比值法”

1. 故障线路与系统其它元件无互感时。

若图—1所示系统中M、N母线电压分别为V_M、V_N，依KCV及KCL定律由图—2得：

$$\left.\begin{aligned}I_MZ_M&=V_N+I_NZ_N-V_M\\ I_MZ_M&=E-V_M-(I_M+I_N)Z_0\end{aligned}\right\} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(10)$$

解方程组（10）可得：

$$1+\frac{I_M}{I_N}=\frac{E(Z_M+Z_N)-V_MZ_N-V_NZ_M}{(E-V_N)Z_M+Z_0(V_M-V_N)} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(11)$$

若只讨论不对称接地故障点的判断，则只需对系统零序网络进行分析，故式（11）中$E=0$。

若令：

$$V=\frac{V_M}{V_N},\quad I=\frac{I_M}{I_N} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(12)$$

由式（11）和（12）得：

$$1+I=\frac{1+V\dfrac{Z_N}{Z_M}}{1+(1-V)\dfrac{Z_0}{Z_M}} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(13)$$

将式（13）代入式（2）中

$$a=\frac{A'}{1+C'V}-B' \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(14)$$

式中：

$$\left.\begin{aligned}A'&=A\left[1+\frac{Z_0}{Z_M}+\frac{Z_0}{Z_N}\right]\\ B'&=B+\frac{Z_0}{Z_N}\\ C'&=\frac{Z_N}{Z_M}\end{aligned}\right\} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots(15)$$

由式（15）知，A'、B'、C'在给定的系统运行方式下其为定常数。式（14）中α是V的单值函数。式（14）为“电压比值法”的理论依据。为供使用方便，可按式（14）绘出$\alpha=f(V)$的曲线；其绘制也是方便的——只要确定常数A'、B'、C'就行了；A'、B'、C'的确定方法如下：

若已知：M处短路时的$V=V'$，$I=I'$；

N处短路时的$V=V''$，$I=I''$。

由式（3）、（5）得：

$$C'=\frac{I''(1+I')}{1+I''} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(16)$$

由式（14）得：

$$\left.\begin{aligned}&A'-B'(1+C'V')=0\\&A'-(B'+1)(1+C'V'')=0\end{aligned}\right. \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(17)$$

解方程组（17）得：

$$\left.\begin{aligned}B'&=\frac{1+C'V''}{C'(V'-V'')}\\A'&=(1+C'V')B'\\&=\frac{(1+C'V')(1+C'V'')}{C'(V'-V'')}\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(18)$$

2. 故障线路为具有互感的双回线之一时。

和前述一样，此地只讨论不对称接地故障问题，且两回线具有相同长度和参数。

由图一4取回路$M—M'—N'—N—M$，$M—0—N—M$及$M—0—E—M$，依KCV、KCL定律有：

$$\begin{bmatrix}\alpha Z_{(m)}, & (\alpha-1)Z_{L(m)}, & Z_L\\ -Z_M, & Z_N, & -(Z_M+Z_N)\\ Z_M+Z_0, & Z_0, & Z_M\end{bmatrix}\begin{bmatrix}I_M\\I_N\\I_{MN}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}V_M-V_N\\V_M-V_N\\-V_M\end{bmatrix} \quad (19)$$

对方程（19）求解，且考虑

$$I=\frac{I_M}{I_N}$$

得：

$$1+I=\frac{[V_MZ_N+V_NZ_M][Z_L-Z_{L(m)}]}{V_ND-V_MG} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(20)$$

式中：
$$\left.\begin{aligned}D&=[Z_M(Z_N+Z_L)+(Z_M+Z_N+Z_L)Z_0-Z_N\alpha Z_{L(m)}]\\G&=[Z_MZ_N+(Z_M+Z_N+Z_L)Z_0+Z_N\alpha Z_{L(m)}]\end{aligned}\right\} \cdots\cdots(21)$$

将式（20）代入式（8）中，得

$$\alpha=\frac{A'}{1+C'V}-B' \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(22)$$

式中：

$$
\left.\begin{aligned}
V &= \frac{V_M}{V_N} \\
C' &= \frac{V_N}{V_M} \\
A' &= \left[1+\frac{Z_0}{Z_N}+\frac{Z_0}{Z_M}\right]\left[\frac{2\,(Z_M+Z_N)}{Z_L+Z_{L(m)}}+1\right] \\
B' &= \left[1+\frac{Z_0}{Z_N}+\frac{Z_0}{Z_M}\right]\frac{2\,Z_M}{Z_L+Z_{L(m)}}
\end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots (23)
$$

因式（22）和式（14）具有完全相同的形式，故其常数A'、B'也由式（18）确定。

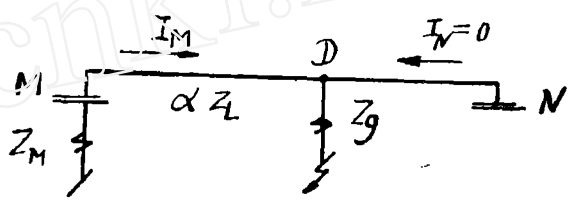
3. 故障线路为单供的单回线时。

若线路一端变压器中性点（与该线路同一电压级的）不接地时——如图—6所示，前述方程将无效。因N侧至故障点电流为零，故：

$$V_N = V_D \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (25)$$

由图—6依KCV定律得：

$$
\left.\begin{aligned}
I_M &= \frac{V_M - V_N}{\alpha Z_L} \\
I_M &= \frac{-V_M}{Z_M}
\end{aligned}\right\} \cdots\cdots (26)
$$



图—6，单供的单回线等值网络

解方程（26），且令

$$V = \frac{V_M}{V_N} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (27)$$

得：

$$\alpha = \frac{Z_M}{Z_L} \quad \frac{1-V}{V} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (28)$$

三、结　　论

从以上分析不难看出，用故障线路两侧的电量（电流、或电压），能科学有效地判定故障点位置。对故障量测量精度上，只要求两侧相对误差小就行了，不需对各侧电量测量误差作过分的要求。

“电流比值法”和“电压比值法”对于判定不对称接地短路故障点的位置是一类可行、较准确的方法；尤其是“电压比值法”是一种更为“可靠”的方法。

若只从判定故障点位置（不对称接地短路）来确定故障录波装置的数量，无论电站的110KV以上的出线条数有多少，每站装设两套就够了；该装置宜由各级电压母线的$3V_0$元件启动，其定值应按线末故障有足够灵敏度取值。