

DOI: 10.7667/PSPC161637

## 工频变化量距离继电器耐受过渡电阻性能分析

雷霖<sup>1,2</sup>, 赖真良<sup>1,2</sup>, 朱家龙<sup>1</sup>, 赵永鑫<sup>2</sup>

(1. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039; 2. 成都大学信息科学与工程学院, 四川 成都 610106)

**摘要:** 对工频变化量距离继电器的判据进行详细分析, 得到继电器经过渡电阻短路时各类故障的判据, 单相接地短路故障和相间直接短路判据存在差异, 各种类型的三相对称故障和两相接地故障动作判据与相间直接短路判据一致。并指出: 单相接地故障时过渡电阻对继电器性能影响最大, 相间故障次之。定义了使继电器能正确动作的最大耐受过渡电阻为临界电阻, 推导出临界电阻的计算式。给出了电流分布系数、整定因子和继电器临界电阻曲线的定义, 指出: 系统工况变化和故障距离将导致电流分布系数变化, 从而导致临界电阻变化; 负荷和两端电源幅值比对整定因子产生较大影响, 减小整定因子, 有利于增加继电器的临界电阻和保护范围。通过 Matlab 仿真验证了上述分析的正确性。

**关键词:** 工频变化量; 距离继电器; 过渡电阻; 临界电阻; 分配系数; 整定因子

### Performance analysis of endure transition resistance of distance relay based on the power-frequency voltage and current variation

LEI Lin<sup>1,2</sup>, LAI Zhenliang<sup>1,2</sup>, ZHU Jialong<sup>1</sup>, ZHAO Yongxin<sup>2</sup>

(1. Xihua University School of Electrical Engineering and Electronic Engineering, Chengdu 610039, China;

2. Chengdu University School of Information Science and Engineering, Chengdu 610106, China)

**Abstract:** The criterion of the distance relay based on the power-frequency voltage and current variation is analyzed in detail and will get the criterion of various faults when the relay passes through transition resistance. There is difference between the single-phase-to-ground fault and the phase-phase direct short-circuit fault. The criterion of three-phase symmetrical fault and phase-phase-ground fault of various types are similar as phase-phase short-circuit fault. And it points out: transition resistance has the most important influence on relay performance when the single-phase grounding fault occurred, and second to phase-to-phase short-circuit fault. The threshold resistance is defined as the maximum tolerance transition resistance which the relay could correct operated, and the calculation formula of the threshold resistance is derived. The definition of sequence-current-distribution coefficient, adjusting-factor, threshold resistance curve are given, which points out: sequence-current-distribution coefficient will be accompanied by system-operating-status changed, fault distance changed, and the threshold resistance changed. The load and amplitude-ratio of the two ends have great influence on the adjusting factor. Reducing the adjusting factor makes for increasing the threshold resistance and the protection scope of the relay. The correctness of the above analysis is verified by Matlab simulation.

**Key words:** power-frequency voltage and current variation; distance relay; transition resistance; threshold resistance; sequence-current-distribution coefficient; adjusting factor

## 0 引言

20 世纪 80 年代, 有学者提出了基于工频变化量为特征量的距离继电器和方向继电器, 其中工频变化量距离继电器具有理论分析和构成原理简单、

动作速度快和不需要振荡闭锁等诸多优点<sup>[1-2]</sup>, 还具有非常强的自适应能力<sup>[3]</sup>。随后基于工频变化量为特征量研制出超高速方向保护 JKF-1 保护装置<sup>[4]</sup>。工频变化量距离继电器凭借其优良的性能, 得到广泛的使用。然而也存在很多问题: 继电器在系统空载合闸和重合闸动作时会误动<sup>[5]</sup>; 继电器的保护范围受线路沿线电压分布、系统阻抗、可靠系数、分

布电容、负荷和衰减直流分量的影响<sup>[6-7]</sup>；在一定的负荷条件下，距离继电器有可能出现稳态超越问题<sup>[8]</sup>，线路串补电容会导致暂态超越<sup>[9]</sup>，CVT 暂态过程也可能导致工频变化量距离保护超越<sup>[10]</sup>，采用提高动作门槛值可有效防止超越问题<sup>[8-10]</sup>；保护背后线路含等效容性阻抗元件或者限流器投入，影响系统的测量阻抗，导致继电器的误动作<sup>[11]</sup>。随着新能源的发展，DG 大规模接入，微电网对保护提出了新的要求<sup>[12-14]</sup>，采用工频变化量的序分量距离保护，在并网和孤岛两种情况下，继电器均能够可靠动作<sup>[15]</sup>；在高压直流输电中，交流电网故障引发 LCC-HVDC 换相失败，将改变工频变化量方向保护动作特性<sup>[16]</sup>。以上文献指出影响工频变化量为特征量的继电器的因子，并给出了改进措施。而现有的文献没有对过渡电阻对工频变化量距离继电器性能的影响进行分析。本文研究了工频变化量距离继电器的耐受过渡电阻能力，讨论了故障位置、系统阻抗、负荷、电源幅值比和可靠系数对继电器耐受过渡电阻能力的影响。

## 1 工频变化量距离继电器判据重构

### 1.1 输电线路故障分析

假定系统为双端电源，电力系统故障分析时，可以运用叠加原理将其分解成故障附加分量网络和正常运行分量网络，如图 1 所示。

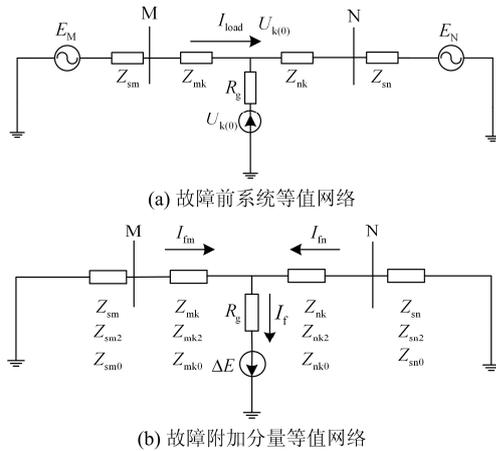


图 1 输电线路故障及其等值网络

Fig. 1 Transmission line fault and its equivalent network

在上述网络中，各个参数定义如下：

$E_M$ 、 $E_N$  分别为 M、N 侧电源电动势相量； $Z_{sm}$ 、 $Z_{sm2}$ 、 $Z_{sm0}$  分别为 M 侧系统正序阻抗、负序阻抗和零序阻抗； $Z_{sn}$ 、 $Z_{sn2}$ 、 $Z_{sn0}$  分别为 N 侧系统正序阻抗、负序阻抗和零序阻抗； $Z_{mk}$ 、 $Z_{mk2}$ 、 $Z_{mk0}$  分

别为 M 侧保护安装处到故障处的输电线路正序阻抗、负序阻抗和零序阻抗； $Z_{nk}$ 、 $Z_{nk2}$ 、 $Z_{nk0}$  分别为 N 侧保护安装处到故障处的输电线路正序阻抗、负序阻抗和零序阻抗； $R_g$  为故障处的过渡电阻；

$I_g$ 、 $I_{load}$ 、 $I_{fm}$ 、 $I_{fn}$  分别为故障处故障电流相量、正常时负荷电流相量、故障时 M 侧电流相量和故障时 N 侧电流相量； $U_{k(0)}$ 、 $\Delta E$  分别为故障处故障前的电压相量、故障后在故障处附加的等效电动势，两者幅值相同，相角差  $2\pi$ 。

$$\angle \frac{E_M}{E_N} = \gamma e^{j\delta}, \quad A = \frac{Z_{sm} + Z_{mk}}{Z_{11}}, \quad \text{假定各个阻}$$

抗阻抗角相同， $Z_{11} = Z_{ms} + Z_{mk} + Z_{nk} + Z_{ns}$ ，那么故障处的电压相量也可以表示为

$$U_{k(0)} = E_N \sqrt{A^2 + 2\gamma \cos \delta A(1-A) + \gamma^2(1-A)^2} \quad (1)$$

输电线路发生故障时，根据对称分量法，可以将故障等值网络分解成正序网络、负序网络和零序网络，将各序网络化简得到其对应等值网络，各序网络及其对应等值网络如图 2 所示。

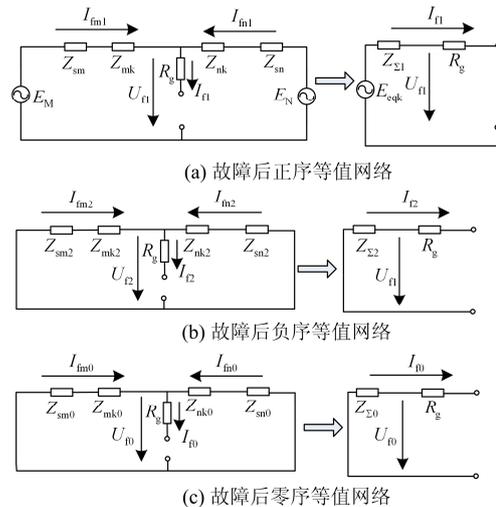


图 2 故障后序网络及其等值网络

Fig. 2 Sequence network and its equivalent network after fault

$U_{f1}$ 、 $U_{f2}$ 、 $U_{f0}$  分别为故障处的故障附加分量的正序电压相量、负序电压相量和零序电压相量； $I_{f1}$ 、 $I_{f2}$ 、 $I_{f0}$  分别为故障处的故障附加分量的正序电流相量、负序电流相量和零序电流相量； $I_{fm1}$ 、 $I_{fm2}$ 、 $I_{fm0}$  分别为 M 侧故障分量的正序电流相量、负序电流相量和零序电流相量； $I_{fn1}$ 、 $I_{fn2}$ 、 $I_{fn0}$  分别为 N 侧故障分量的正序电流相量、负序电流相量和零序电流相量。

M、N 两侧的序电流的关系为

$$\begin{cases} I_{f1} = I_{f11} + I_{f12}, I_{f2} = I_{f21} + I_{f22}, I_{f0} = I_{f01} + I_{f02} \\ I_{f11} = C_{1m} I_{f1}, I_{f12} = C_{2m} I_{f2}, I_{f01} = C_{0m} I_{f0} \\ I_{f21} = C_{1n} I_{f1}, I_{f22} = C_{2n} I_{f2}, I_{f02} = C_{0n} I_{f0} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $C_{1m}$ 、 $C_{2m}$ 、 $C_{0m}$  分别为 M 侧故障分量的正序电流分配系数、负序电流分配系数和零序电流分配系数;  $C_{1n}$ 、 $C_{2n}$ 、 $C_{0n}$  分别为 N 侧故障分量的正序电流分配系数、负序电流分配系数和零序电流分配系数。各个系数的值为

$$\begin{cases} C_{1m} = (Z_{sn} + Z_{nk}) / (Z_{sn} + Z_{nk} + Z_{sm} + Z_{mk}) \\ C_{2m} = (Z_{sn2} + Z_{nk2}) / (Z_{sn2} + Z_{nk2} + Z_{sm2} + Z_{mk2}) \\ C_{0m} = (Z_{sn0} + Z_{nk0}) / (Z_{sn0} + Z_{nk0} + Z_{sm0} + Z_{mk0}) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} C_{1n} = (Z_{sm} + Z_{mk}) / (Z_{sn} + Z_{nk} + Z_{sm} + Z_{mk}) \\ C_{2n} = (Z_{sm2} + Z_{mk2}) / (Z_{sn2} + Z_{nk2} + Z_{sm2} + Z_{mk2}) \\ C_{0n} = (Z_{sm0} + Z_{mk0}) / (Z_{sn0} + Z_{nk0} + Z_{sm0} + Z_{mk0}) \end{cases} \quad (4)$$

而实际的工程应用中可以认为正序阻抗与负序阻抗相等, 则有

$$\begin{cases} C_{1m} = C_{2m}, I_{f11} = I_{f12} = I_{f1} C_{1m} \\ C_{1n} = C_{2n}, I_{f21} = I_{f22} = I_{f1} C_{1n} \end{cases} \quad (5)$$

## 1.2 工频变化量距离继电器动作判据

工频变化量距离继电器的判据是基于输电线路故障后的故障附加分量, 如图 1 所示。其反映的是工频变化的电压相量和工频变化的电流相量的距离保护。其动作判据为

$$|\Delta U_{op}| \geq |\Delta E| \quad (6)$$

式中:  $\Delta U_{op}$  为距离继电器工作的工频变化量电压相量;  $\Delta E$  为距离继电器故障处的工频变化量电压相量。单相接地故障有

$$\begin{cases} \Delta U_{op} = \Delta U_m - (\Delta I + 3k_0 I_0) \times Z_{set} \\ \Delta E = \Delta U_m - (\Delta I + 3k_0 I_0) \times Z_{mk} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\Delta U_m$ 、 $\Delta I$  分别为保护安装处提取的电压相量的工频变化量和电流相量的工频变化量;  $Z_{set}$  为保护的整定阻抗, 一般取线路的正序阻抗的 80%~85%, 本文取  $l_0 = 0.85$ , 即有  $Z_{set} = l_0 Z_{m1}$ ;  $I_0$  为保护安装处零序电流;  $k_0$  为零序补偿系数, 且  $k_0 = (z_0 - z_1) / 3z_1$ ,  $z_0$  为输电线路单位长度零序阻抗,  $z_1$  为单位长度正序阻抗。

下面以 M 侧继电器为例, 对其判据加以讨论。

1) 单相接地故障, 以 A 相接地为例。

其判据为利用短路故障的边界条件对式(6)和式(7)用序分量表示。

$$\begin{aligned} \Delta U_{op} &= \Delta U_m - (\Delta I + 3k_0 I_0) \times Z_{set} = \\ &= -(I_{f11} Z_{sm} + I_{f12} Z_{sm2} + I_{f01} Z_{sm0}) - \\ &= (I_{f11} l_0 Z_{m1} + I_{f12} l_0 Z_{m2} + I_{f01} l_0 Z_{m0}) = \\ &= -(C_{1m} I_{f1} Z_{sm} + C_{2m} I_{f2} Z_{sm2} + C_{0m} I_{f0} Z_{sm0}) - \\ &= (C_{1m} I_{f1} l_0 Z_{m1} + C_{2m} I_{f2} l_0 Z_{m2} + C_{0m} I_{f0} l_0 Z_{m0}) = \\ &= -I_{f1} (2C_{1m} Z_{sm} + C_{0m} Z_{sm0}) - I_{f1} (2C_{1m} l_0 Z_{m1} + C_{0m} l_0 Z_{m0}) = \\ &= -I_{f1} (2C_{1m} Z_{sm} + q C_{1m} Z_{sm0}) - I_{f1} (2C_{1m} l_0 Z_{m1} + q C_{1m} l_0 Z_{m0}) = \\ &= -3C_{1m} I_{f1} Z_{sm}^1 - 3C_{1m} I_{f1} Z_{set}^1 = -\Delta I_\phi (Z_{sm}^1 + Z_{set}^1) \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $q$  为零序阻抗变换系数, 其值为  $q = C_{0m} / C_{1m}$ ;  $Z_{sm}^1$  为 M 侧系统变换阻抗, 其值为  $Z_{sm}^1 = (2Z_{sm} + qZ_{sm0}) / 3 = Z_{sm} (2 + qx_{sm}) / 3$ ,  $x_{sm}$  为 M 侧系统的零序阻抗与正序阻抗比值;  $Z_{set}^1$  为变换整定阻抗,  $Z_{set}^1 = (2l_0 Z_{m1} + ql_0 Z_{m0}) / 3 = l_0 Z_{m1} (2 + qx_1) / 3$ ,  $x_1$  为输电线路单位长度的零序阻抗与正序阻抗比值;  $\Delta I_\phi$  为保护安装 A 相工频电流变化量,  $\Delta I_\phi = 3C_{1m} I_{f1}$ 。

同理可以推导出金属性短路故障, 其值为

$$\Delta E = -3C_{1m} I_{f1} Z_{sm}^1 - 3C_{1m} I_{f1} Z_{mk}^1 = -\Delta I_\phi (Z_{sm}^1 + Z_{mk}^1) \quad (9)$$

式中:  $Z_{mk}^1$  为输电线路短路变换阻抗, 其值为  $Z_{mk}^1 = (2Z_{mk} + qZ_{mk0}) / 3 = Z_{mk} L (2 + qx_1) / 3$ ;  $L$  ( $0 < L < 1$ ) 为故障距离。

则金属性短路故障判据为

$$|Z_{sm}^1 + Z_{set}^1| \geq |Z_{sm}^1 + Z_{mk}^1| \quad (10)$$

若是经过渡电阻短路故障, 将式(6)变换得到  $|-3C_{1m} I_{f1} (Z_{sm}^1 + Z_{set}^1)| \geq |-3C_{1m} I_{f1} (Z_{sm}^1 + Z_{mk}^1 + R_g / C_{1m})|$ , 对其化简得到:

$$|Z_{sm}^1 + Z_{set}^1| \geq |Z_{sm}^1 + Z_{mk}^1 + R_g / C_{1m}| \quad (11)$$

2) 两相相间短路故障, 以 BC 相故障为例。

同理推导得到两相短路故障的动作判据为

$$|Z_{sm}^2 + Z_{set}^2| \geq |Z_{sm}^2 + Z_{mk}^2| \quad (12)$$

$$|Z_{sm}^2 + Z_{set}^2| \geq |Z_{sm}^2 + Z_{mk}^2 + R_g / (2C_{1m})| \quad (13)$$

式中:  $Z_{sm}^2$  为变换系统阻抗, 其值为  $Z_{sm}^2 = Z_{sm}$ ;  $Z_{set}^2$  为变换整定阻抗, 其值为  $Z_{set}^2 = l Z_{m1}$ ;  $Z_{mk}^2$  为输电线路短路变换阻抗, 其值为  $Z_{mk}^2 = Z_{mk}$ 。式(12)为金属性故障判据, 式(13)为经过渡电阻短路故障判据。

3) 两相接地故障和三相对称性故障。

两相接地故障, 以 BC 相故障为例: BC 相金属性短接再经过渡电阻接地, 取 BC 相间序分量为特征量, 其判据同两相相间不接地金属性短路故障判据一致; B 相、C 相和地三者间都存在过渡电阻,

取 BC 相间序分量为特征量, 其判据同两相不接地经过渡电阻短路故障判据一致。

对于三相对称故障, 当三相与地都存在过渡电阻时, 采用相-相的工频变化量为特征量, 得到与相间经过渡电阻短路故障一致的判据; 当三相先金属性短接再经过渡电阻接地, 采用相-相的工频变化率为特征量, 得到与相间金属性故障一致的判据。

综上, 各种类型故障的工频变化量距离继电器的判据如表 1。

表 1 各种故障类型的动作判据

Table 1 Criterion of various faults

故障类型		继电器动作判据
单相	-	$ Z_{sm}^1 + Z_{set}^1  \geq  Z_{sm}^1 + Z_{mk}^1 $
接地故障	+	$ Z_{sm}^1 + Z_{set}^1  \geq  Z_{sm}^1 + Z_{mk}^1 + R_g / C_{1m} $
两相	-	$ Z_{sm}^2 + Z_{set}^2  \geq  Z_{sm}^2 + Z_{mk}^2 $
不接地故障	+	$ Z_{sm}^2 + Z_{set}^2  \geq  Z_{sm}^2 + Z_{mk}^2 + R_g / (2C_{1m}) $
两相	-	$ Z_{sm}^2 + Z_{set}^2  \geq  Z_{sm}^2 + Z_{mk}^2 $
接地故障	+	$ Z_{sm}^2 + Z_{set}^2  \geq  Z_{sm}^2 + Z_{mk}^2 + R_g / (2C_{1m}) $
三相	-	$ Z_{sm}^2 + Z_{set}^2  \geq  Z_{sm}^2 + Z_{mk}^2 $
对称短路故障	+	$ Z_{sm}^2 + Z_{set}^2  \geq  Z_{sm}^2 + Z_{mk}^2 + R_g / (2C_{1m}) $

表 1 中, “+” 表示经过渡电阻发生短路故障, “-” 表示金属性短接短路故障。

## 2 继电器耐受过渡电阻能力分析

### 2.1 工频变化量距离继电器临界电阻定义

对于单相接地短路故障, 假定故障在线路的  $L(0 < L < 1)$  处, 当过渡电阻为  $R_{g\phi\max}$  时, 工频变化量距离继电器保护处于临界失效状态, 定义  $R_{g\phi\max}$  为临界电阻, 则此时判据为

$$|Z_{sm}^1 + Z_{set}^1| = |Z_{sm}^1 + LZ_{set}^1 / l_0 + R_{g\phi\max} / C_{1m}|$$

可化为

$$\begin{aligned} & [\operatorname{Re}(Z_{sm}^1 + Z_{set}^1)]^2 + [\operatorname{Im}(Z_{sm}^1 + Z_{set}^1)]^2 = \\ & [\operatorname{Re}(Z_{sm}^1 + LZ_{set}^1 / l_0 + R_{g\phi\max} / C_{1m})]^2 + \\ & [\operatorname{Im}(Z_{sm}^1 + LZ_{set}^1 / l_0 + R_{g\phi\max} / C_{1m})]^2 \end{aligned}$$

对上式处理, 令  $R_{R\phi} = \operatorname{Re}(Z_{sm}^1 + Z_{set}^1)$ ,  $R_{L\phi} = \operatorname{Im}(Z_{sm}^1 + Z_{set}^1)$ ,  $r_{R\phi} = \operatorname{Re}(Z_{sm}^1 + LZ_{set}^1 / l_0)$ ,  $r_{L\phi} = \operatorname{Im}(Z_{sm}^1 + LZ_{set}^1 / l_0)$ , 则上式可以表述为

$$\begin{aligned} R_{R\phi}^2 + R_{L\phi}^2 - (r_{R\phi}^2 + r_{L\phi}^2) &= [\operatorname{Re}(R_{g\phi\max} / C_{1m})]^2 + \\ & [\operatorname{Im}(R_{g\phi\max} / C_{1m})]^2 + 2r_{R\phi} \operatorname{Re}(R_{g\phi\max} / C_{1m}) + \\ & 2r_{L\phi} \operatorname{Im}(R_{g\phi\max} / C_{1m}) = \end{aligned}$$

$$R_{g\phi\max}^2 [1/C_{1m}]^2 + 2R_{g\phi\max} [r_{R\phi} \operatorname{Re}(1/C_{1m}) + r_{L\phi} \operatorname{Im}(1/C_{1m})]$$

由求根公式可以计算出  $R_{g\phi\max}$ 。

$$R_{g\phi\max} = \frac{-B_\phi + \sqrt{B_\phi^2 + 4|1/C_{1m}|^2 F_\phi}}{2 \times |1/C_{1m}|^2} \quad (14)$$

式中:  $B_\phi = 2[r_{R\phi} \operatorname{Re}(1/C_{1m}) + r_{L\phi} \operatorname{Im}(1/C_{1m})]$ ;  $F_\phi = R_{R\phi}^2 + R_{L\phi}^2 - (r_{R\phi}^2 + r_{L\phi}^2)$ 。

对于相间短路故障, 假定故障在线路的  $L$  处, 当过渡电阻为  $R_{g\phi\max}$  时, 工频变化量距离继电器保护处于临界失效状态, 同理定义为临界电阻, 则此时判据为

$$|Z_{sm}^2 + Z_{set}^2| = |Z_{sm}^2 + Z_{mk}^2 + R_{g\phi\max} / (2C_{1m})|$$

同单相短路接地故障类似处理可以得到  $R_{g\phi\max}$ 。

$$R_{g\phi\max} = \frac{-B_{\phi\phi} + \sqrt{B_{\phi\phi}^2 + 4|1/(2C_{1m})|^2 F_{\phi\phi}}}{2 \times |1/(2C_{1m})|^2} \quad (15)$$

式中:  $B_{\phi\phi} = 2[r_{R\phi\phi} \operatorname{Re}(1/2C_{1m}) + r_{L\phi\phi} \operatorname{Im}(1/2C_{1m})]$ ;  $F_{\phi\phi} = R_{R\phi\phi}^2 + R_{L\phi\phi}^2 - (r_{R\phi\phi}^2 + r_{L\phi\phi}^2)$ ;  $R_{R\phi\phi} = \operatorname{Re}(Z_{sm}^2 + Z_{set}^2)$ ,  $R_{L\phi\phi} = \operatorname{Im}(Z_{sm}^2 + Z_{set}^2)$ ;  $r_{R\phi\phi} = \operatorname{Re}(Z_{sm}^2 + LZ_{set}^2 / l_0)$ ,  $r_{L\phi\phi} = \operatorname{Im}(Z_{sm}^2 + LZ_{set}^2 / l_0)$ 。

其他类型故障的临界电阻  $R_{g\max}$ , 采用类似的方法也可以得到。

### 2.2 固定门槛与浮动门槛工频变化量距离继电器性能分析

由于故障距离具有随机性, 无法确定故障位置, 因而  $\Delta E$  也无法确定。在实际现场保护判据中, 有两种办法: 1) 采用固定门槛, 用  $K_{rel}|U_N|$  来替代  $\Delta E$ ,  $K_{rel}|U_N| = |a\Delta E|$ ; 2) 采用浮动门槛, 用  $K_{rel}|U_m^{(0)} - 0.85I_{load}Z_{mn}| = K_{rel}|U_{zd}|$  来替代  $\Delta E$ ,  $K_{rel}|U_{zd}| = |b\Delta E|$ 。

上述  $K_{rel}$  为可靠系数, 一般取 1.1~1.2, 这里取 1.1;  $U_N$  为额定电压,  $U_m^{(0)}$  为保护安装处故障前一刻的记忆电压,  $I_{load}$  为故障前一刻的记忆电流。a、b 取值如式(16)。

$$|a| = \frac{K_{rel}|U_N|}{|\Delta E|}, \quad |b| = \frac{K_{rel}|U_{zd}|}{|\Delta E|} \quad (16)$$

采用固定门槛时的判据和采用浮动门槛时的判据, 如表 2 所示。

表 2 中,  $|x|$  定义为整定因子, 在固定门槛时为  $|a|$ , 在浮动门槛时为  $|b|$ 。

表 2 附加门槛值的各种故障类型的动作判据

Table 2 Criterion of various faults with additional threshold

故障类型		继电器动作判据
单相	-	$ Z_{sm}^1 + Z_{set}^1  \geq  x   Z_{sm}^1 + Z_{mk}^1 $
接地故障	+	$ Z_{sm}^1 + Z_{set}^1  \geq  x   Z_{sm}^1 + Z_{mk}^1 + R_g / C_{1m} $
两相	-	$ Z_{sm}^2 + Z_{set}^2  \geq  x   Z_{sm}^2 + Z_{mk}^2 $
不接地故障	+	$ Z_{sm}^2 + Z_{set}^2  \geq  x   Z_{sm}^2 + Z_{mk}^2 + R_g / (2C_{1m}) $

综上, 在一个确定的电力系统中, 受过渡电阻影响的各种短路故障, 其  $R_{gmax}$  表达式是类似的, 均受  $B$ 、 $F$ 、 $C_{1m}$  影响, 而这些参数均是  $L$  的函数, 故  $R_{gmax}$  也是  $L$  的函数, 可以用表达式  $R_{gmax} = f(L)$  表示, 定义该函数为临界电阻曲线。

则在固定门槛或者浮动门槛时, 工频变化量距离继电器的临界电阻  $R_{gmax} = f(L\%)$  的统一函数表达式为

$$R_{gmax} = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4|x|^2 |1/(fC_{1m})|^2} F}{2 \times |x|^2 |1/(fC_{1m})|^2} \quad (17)$$

上述表达式中, 当为单相接地故障时,  $f = 1$ ,  $B = |x|^2 B_{\phi}$ ,  $F = R_{R\phi}^2 + R_{L\phi}^2 - |x|^2 (r_{R\phi}^2 + r_{L\phi}^2)$ ; 当为相间短路故障时,  $B = |x|^2 B_{\phi\phi}$ ,  $F_{\phi\phi} = R_{R\phi\phi}^2 + R_{L\phi\phi}^2 - |x|^2 (r_{R\phi\phi}^2 + r_{L\phi\phi}^2)$ ,  $f = 2$ 。

### 3 故障类型、分配系数和整定因子对临界电阻的影响

#### 3.1 故障类型对临界电阻的影响

忽略阻抗中电阻分量、整定因子和分配系数的影响, 则用式(15)除以式(14)得到

$$R_g \% = \frac{R_{g\phi\phi\max}}{R_{g\phi\max}} = 4 \times \frac{-B_{\phi\phi} + \sqrt{B_{\phi\phi}^2 + 4|1/(2C_{1m})|^2} F_{\phi\phi}}{-B_{\phi} + \sqrt{B_{\phi}^2 + 4|1/C_{1m}|^2} F_{\phi\phi}} = \frac{-4B_{\phi\phi} + 4\sqrt{B_{\phi\phi}^2 + (1/C_{1m})^2} F_{\phi\phi}}{-k_1^2 B_{\phi\phi} + \sqrt{k_1^2 B_{\phi\phi}^2 + k_1(1/C_{1m})^2} F_{\phi\phi}} \quad (18)$$

式中:  $k_1 = 3 / (2 + qx_1)$ ; 且认为  $x_1 = x_{sm}$ , 则此时  $q = 1$ 。

在式(18)中, 结合式(11)和式(13)可以得到,  $x_1$  在  $(0, 1)$  存在一个  $x_{10}$ , 使得式(18)中分子分母相同。当  $x_{s1} = x_{10}$  时,  $R_g \% = 100\%$ ; 当  $x_{s1} > x_{10}$  时,  $R_g \% > 100\%$ ; 当  $0 < x_{s1} < x_{10}$  时,  $0 < R_g \% < 100\%$ 。

故由上述分析可知, 在其他运行条件和故障距

离完全一致时, 继电器在单相故障和相间故障时的临界电阻不同, 一般情况下零序电抗大于正序电抗; 故相间故障时继电器的临界电阻大于单相故障时的临界电阻。

#### 3.2 分配系数对临界电阻的影响

以单相故障为例, 忽略阻抗中电阻分量、整定因子和故障距离的影响。

式(14)对分配系数求偏导有

$$\frac{\partial R_{g\phi\max}}{\partial C_{1m}} = -\frac{-2(Z_{sm}^1 + LZ_{set}^1 / l_0) + \sqrt{(2(Z_{sm}^1 + LZ_{set}^1 / l_0))^2 + 4F}}{2} \quad (19)$$

$\frac{\partial R_{g\phi\max}}{\partial C_{1m}} > 0$  恒成立; 即分配系数增大, 临界电阻增

大; 故继电器临界电阻随分配系数增大而增大。

#### 3.3 整定因子对临界电阻的影响

以单相故障为例, 忽略阻抗中电阻分量, 式(17)对整定因子求偏导得

$$\frac{\partial R_{g\phi\max}}{\partial |x|} = -|x|^{-2} \frac{\sqrt{B_{\phi}^2 + 4|1/(C_{1m})|^2} F}{2|1/(C_{1m})|^2} \quad (20)$$

式中,  $\frac{\partial R_{g\phi\max}}{\partial |x|} < 0$  恒成立; 即整定因子增大, 临界

电阻减小。故随着整定因子减小, 继电器的临界电阻随之增大。

令  $\mu = \frac{U_N}{U_{k(0)}}$ , 由式(1)和式(16)可知, 整定因子

可表述为

$$|x| = \frac{\mu K_{rel}}{\sqrt{A^2 + 2\gamma \cos \delta A(1-A) + \gamma^2(1-A)^2}} \quad (21)$$

由式(21)可知, 整定因子受负荷、电压幅值比和故障距离的影响。

式(21)对  $\delta$  求偏导, 可得到负荷对整定因子的影响:

$$\frac{\partial |x|}{\partial \delta} = \frac{\mu K_{rel} \gamma \sin \delta A(1-A)}{(A^2 + (2\gamma \cos \delta)A(1-A) + \gamma^2(1-A)^2)^{1.5}} \quad (22)$$

由式(22)可得, 当  $0^\circ \leq \delta < 90^\circ$  时,  $|x|$  为严格增函数;  $0^\circ > \delta > -90^\circ$  时,  $|x|$  为严格增函数。即继电器无论是工作在受电侧还是送电侧,  $|x|$  都随负荷的增大而增大; 故继电器的临界电阻随负荷增大而减小。

式(21)对求  $\gamma$  偏导, 可得到电压幅值比对整定因子的影响:

$$\frac{\partial |x|}{\partial \gamma} = \frac{-\mu K_{rel} (A(1-A) \times \cos \delta + \gamma(1-A)^2)}{(A^2 + A(1-A) \times 2\gamma \cos \delta + \gamma^2(1-A)^2)^{1.5}} \quad (23)$$

由于  $\gamma > 0$  恒成立, 根据式 (23) 可知, 当  $-90^\circ \leq \delta < 90^\circ$  时,  $\frac{\partial |x|}{\partial \gamma} < 0$  恒成立, 即对于 M 侧, 当  $\gamma$  增大时  $|x|$  随着减小, 故 M 侧继电器的临界电阻随  $\gamma$  增大而增大; 对于 N 侧, 当  $\gamma$  增大时  $|x|$  随着增大, 故 N 侧继电器的临界电阻随  $\gamma$  增大而减小。

## 4 实例分析

### 4.1 实例参数设置

本文采用 Matlab 软件, 建立双端电源电力系统以分析工频变化量距离继电器耐受过渡电阻的能力。参考京津唐超高压 500 kV 输电线路, 按分布参数建立一条 300 km 长的线路。其具体参数如下。

正序参数:  $r_1 = 0.02083 \Omega/\text{km}$ ,  $l_1 = 0.8948 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $c_1 = 0.0129 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

零序参数:  $r_0 = 0.1148 \Omega/\text{km}$ ,  $l_0 = 2.2886 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $c_0 = 0.00523 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

M 侧系统参数:  $Z_{ms} = 1.0515 + j43.15302 \Omega$ ,  $Z_{ms0} = 0.6 + j29.0764 \Omega$ ,  $E_m = 525 \angle 0^\circ \text{ kV}$ 。

N 侧系统参数:  $Z_{ns} = 26 + j44.89572 \Omega$ ,  $Z_{ns0} = 20 + j37.45078 \Omega$ ,  $E_n = 500 \angle -30^\circ \text{ kV}$ 。

继电器 I 段整定范围为 85%, 即按全长等效阻抗的 0.85 来整定。

### 4.2 理想工频变化量距离继电器特性分析

#### 1) 运行工况(分配系数)的影响

系统运行工况发生变化, 则系统阻抗发生变化, 正序和零序分配系数将发生变化。假定继电器为理想工频变化量继电器, 当 M 侧系统阻抗不变, 按 N 侧系统阻抗的 1、0.6、0.2 倍取值, 则 M、N 两侧继电器临界电阻曲线如图 3 所示。

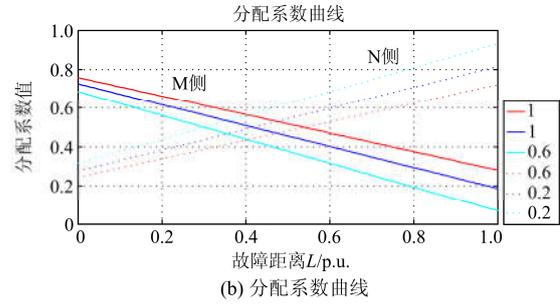
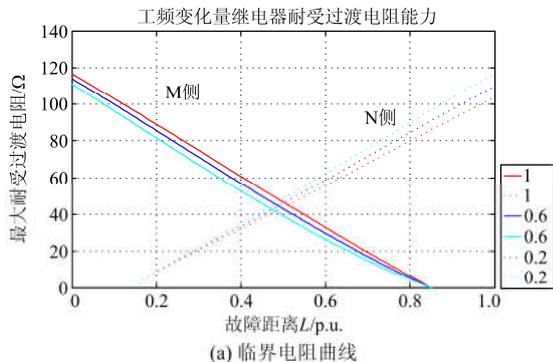


图 3 三种工况下临界电阻曲线

Fig. 3 Threshold resistance curve under three system-operating-status

图 3 中红色曲线、蓝色曲线和青绿色曲线分别为  $Z_{ms}$  按 N 侧系统阻抗的 1、0.6、0.2 取值时的  $R_{gmax} = f(L\%)$  临界电阻曲线。根据图 3(a) 可以得到: 系统阻抗变化, 对输电线路两端继电器的临界电阻均有影响。当  $L=0$ , M 侧耐受过渡电阻分别为 116.56  $\Omega$ 、114.02  $\Omega$  和 111  $\Omega$ , N 侧耐受过渡电阻分别为 103.67  $\Omega$ 、109.72  $\Omega$  和 116.98  $\Omega$ , 继电器的临界电阻随故障位置远离继电器, 其临界电阻随之减小。结合图 3(b) 所示: N 侧系统阻抗减小, M 侧正序电流分配系数减小, N 侧正序电流分配系数增大, 正序电流分配系数随着故障位置远离继电器而减小。结合图 3(a) 和图 3(b) 可以得到, 系统工况和故障位置  $L$  变化, 正序电流分配系数随之变化, 继电器的耐受过渡电阻能力与其正序分配系数是正相关的。

#### 2) 故障类型影响

忽略其他因子影响时, 图 4 给出两种故障类型继电器临界电阻曲线。

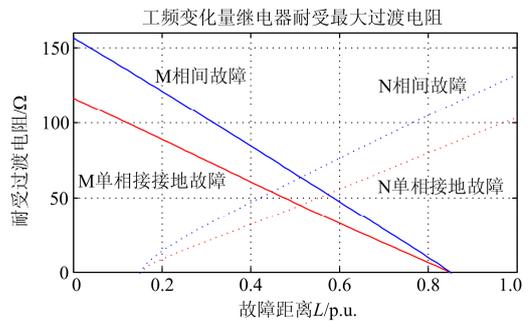


图 4 两种故障类型下临界电阻曲线

Fig. 4 Threshold resistance curve under two types of fault

结合图 4 可以知道, 对于 M 侧:  $L=0$  发生单相接地短路故障,  $R_{gmax} = 116.56 \Omega$ ;  $L=0$  发生相间短路故障,  $R_{gmax} = 156.66 \Omega$ 。对于 N 侧: 在  $L=0$  发生单相接地短路故障,  $R_{gmax} = 103.67 \Omega$ ; 在  $L=0$  发生相间短路故障时,  $R_{gmax} = 132.3 \Omega$ 。故单相接地故障

比两相相间故障耐受过渡电阻能力弱,单相接地故障时,继电器发生误动的风险更大。

#### 4.3 固定门槛工频变化量距离继电器特性分析

假定运行工况不变,将负荷和M、N两侧电压幅值以及故障距离 $L$ 对继电器的耐受过渡电阻能力的影响抽象成 $|x|$ 整定因子的影响,分析 $|x|$ 整定因子对继电器耐受过渡电阻能力的影响。此时, $K_{rel}=1.1$ ,图5给出了 $|x|$ 整定因子取0.95、1、1.05、1.1和1.15时继电器的临界曲线。

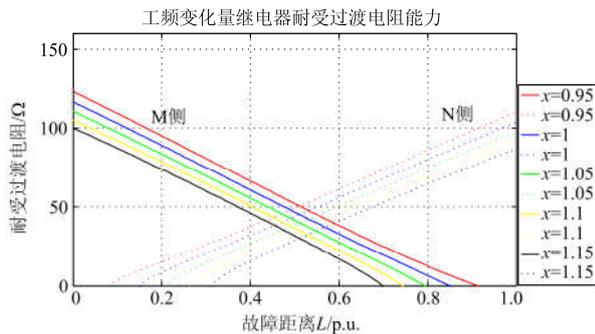


图5 五种整定因子下临界电阻曲线

Fig. 5 Threshold resistance curve under five adjusting factors

图5中,红色曲线、蓝色曲线、绿色曲线、黄色曲线和黑色曲线分别是 $|x|$ 系数取值为0.95、1、1.05、1.1和1.15时继电器的 $R_{gmax}=f(L\%)$ 临界电阻曲线。对于M侧, $L=0$ 时, $|x|$ 整定因子取值为0.95、1、1.05、1.1、1.15时, $R_{gmax}$ 的值为123.18Ω、116.56Ω、110.55Ω、105.05Ω、100.02Ω;保护失效的距离0.91、0.85、0.79、0.74、0.70。从图5可以得到, $|x|$ 整定因子越小耐受过渡电阻能力越强,保护范围越大。一般工频变化量继电器 $|x|$ 整定因子都大于1, $|x|$ 整定因子使继电器耐受过渡电阻能力变差和保护范围变小,其值越小(靠近1),继电器耐受过渡电阻能力越好。

## 5 结论

工频变化量距离继电器的临界电阻相比其他距离继电器的临界电阻存在以下特点:

1) 该继电器其经过渡电阻发生故障的动作判据同金属性短路故障的动作判据不一致。可将各种故障类型划分为单相经过渡电阻接地故障和相间经过渡电阻接地故障,其判据有所差别。

2) 相间故障的临界电阻比单相接地故障的临界电阻要大得多,表现出更好的耐受过渡电阻能力。

3) 继电器的临界电阻随着故障距离增大而减小,直至保护范围末端时临界电阻为0;故障距离

和系统运行工况的变化都会导致分配系数的变化,临界电阻的大小与分配系数正相关。

4) 整定因子受双侧电源电动势的幅值比、负荷大小和故障位置影响。负荷增大会导致整定因子增大;电动势幅值比增大,M侧整定因子会随之变小,N侧整定因子会随之增大。整定因子大小对临界电阻影响十分明显,整定因子越小,临界电阻越大。

## 参考文献

- [1] 沈国荣. 工频变化量方向继电器原理的研究[J]. 电力系统自动化, 1983, 7(1): 28-38.  
SHEN Guorong. A new directional relay on the variation of power frequency components[J]. Automation of Electric Power Systems, 1983, 7(1): 28-38.
- [2] 沈国荣. 工频变化量距离继电器的研究[C] // 中国电机工程学会第四次全国继电保护及安全自动装置学术会议, 烟台, 1986.  
SHEN Guorong. A new distance relay based on the variation of power frequency components[C] // Proceedings of the 4th conference on relay protection of CSEE, Yantai, 1986.
- [3] 戴学安. 继电保护原理的重大突破-综论工频变化量继电器[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(1): 41-47.  
DAI Xuean. A brief discussion on the protection relay based on power frequency variation principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(1): 41-47.
- [4] 沈国荣. 超高速方向保护—JKF-1[J]. 电力系统自动化, 1987, 11(3): 12-17.  
SHEN Guorong. Developing a new ultra-high speed directional comparison protection—JKF-1[J]. Automation of Electric Power Systems, 1987, 11(3): 12-17.
- [5] 陈曙玲, 温阳东. 单电源短距离输电线路微机距离保护的研究[J]. 继电器, 2003, 31(2): 23-26.  
CHEN Shuling, WEN Yangdong. Study of the microcomputer distance protection in single source and short distance transmission line[J]. Relay, 2003, 31(2): 23-26.
- [6] 姚旭, 何方明, 索南加乐, 等. 工频变化量距离元件一些问题的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 78-83.  
YAO Xu, HE Fangming, SUONAN Jiale, et al. Some discussion on the fault component distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 78-83.
- [7] 索南加乐, 何方明, 焦在滨, 等. 工频变化量距离元件特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 59-65.  
SUONAN Jiale, HE Fangming, JIAO Zaibin, et al.

- Research on the characteristics of distance element based on the power-frequency voltage and current variation[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 59-65.
- [8] 刘世明, 林湘宁, 杨春明. 工频变化量距离继电器的统一表达方式[J]. 电网技术, 2002, 26(5): 23-27.  
LIU Shiming, LIN Xiangning, YANG Chunming. Unified expression of fault-component distance relay[J]. Power System Technology, 2002, 26(5): 23-27.
- [9] 李园园, 郑玉平, 沈国荣. 串补电容对工频变化量距离保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(24): 37-40.  
LI Yuanyuan, ZHENG Yuping, SHEN Guorong. Influence of series capacitor on incremental power frequency distance relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(24): 37-40.
- [10] 刘海洋, 谈顺涛, 许志鹏, 等. CVT 暂态特性对工频变化量距离保护的影响[J]. 继电器, 2006, 34(2): 1-5.  
LIU Haiyang, TAN Shuntao, XU Zhipeng, et al. Influence of transient process of CVT on incremental power frequency distance relay[J]. Relay, 2006, 34(2): 1-5.
- [11] 徐妍, 陆广香, 徐晓敏, 等. 关于工频变化量距离保护可靠性的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 51-57.  
XU Yan, LU Guangxiang, XU Xiaomin, et al. Research on the reliability of the distance protection using power frequency variable components[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 51-57.
- [12] 周龙, 齐智平. 微电网保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 147-154.  
ZHOU Long, QI Zhiping. A review of the research on microgrid protection development[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.
- [13] LAAKSONEN H J. Protection principles for future microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 2910-2918.
- [14] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 7pp. DOI 10.1186/s41601-016-0025-x
- [15] 荣雅君, 王娜. 基于工频变化量的序分量距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 98-103.  
RONG Yajun, WANG Na. Sequence components distance protection based on power frequency variation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 98-103.
- [16] 徐岩, 刘泽锴, 应璐曼. 混合 MIDC 馈入下的工频变化量阻抗方向保护动作特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 14-20.  
XU Yan, LIU Zekai, YING Luman. Performance of impedance directional protection based on variation of power-frequency components in hybrid multi-infeed HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 14-20.

收稿日期: 2016-09-29; 修回日期: 2016-12-20

作者简介:

雷霖(1963—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电子技术、现场总线和继电保护; E-mail: 552429528@qq.com

赖真良(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 610513782@qq.com

(编辑 魏小丽)