

负序电流微分元件的分析

甘肃省电力工业局调度所 李春方

一九七七年在锦州会议上交流了东北电力系统改制负序电流增量元件的经验，现在得到了广泛使用。实践表明，负序电流微分（下称微分）元件对于解决距离保护失压、振荡、对称性故障等问题起到了良好的效果，从而提高了距离保护装置的正确动作率。

负序电流微分元件的工作原理，是根据短路时电流变化速度快，异常运行时电流变化速度慢的特点，采用阻容构成的微分电路来测量负序电流的变化速度，以判别异常与故障。

一、电容微分电路

负序（零序）电流微分元件就是电容与电阻组成的微分电路的一例。

ϕI_2 —负序电流滤过器

ϕI_0 —零序电流滤过器

BZ—单相全波整流器

R_1 —电容器放电电阻

R_2 —执行元件（极化继电器）电阻

C—微分电容器

$U_1 = M I_2$

M—负序电流滤过器的转移阻抗

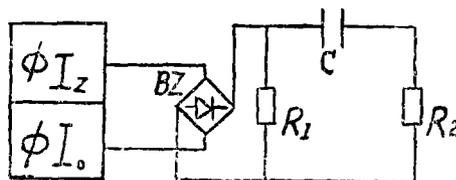


图1 负序(零序)电流微分元件原理图

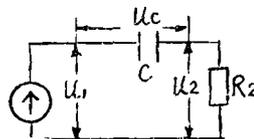


图2 负序(零序)电流微分元件等效电路图

1 输入电压导数的获得

从图—2可知，电容器上的电压和通过它的电流之间的关系，可用下式表达：

$$i_c = c \frac{dU_c}{dt} \dots \dots \dots (1)$$

由(1)式可知，为了得到输出电压的形状是输入电压的导数，必须在电容器电路中串联一个电阻，而从这个电阻两端取出与电流成正比的电压。如果这个电阻的阻值足够小，而对电流无显著的影响，则可以用(1)式来近似地求出这个电流值。实际上 $U_1 \approx U_c$ ，因此，电阻 R_2 上的电压将近似的等于：

$$U_2 = iR_2 = R_2 C \frac{dU_1}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

(2)式又可改写为:

$$U_2 = R_2 C \frac{d(MI_2)}{dt} = R_2 CM \frac{dI_2}{dt} \dots\dots\dots (3)$$

由(2)式可以看出, R_2 的作用越小, 则 U_2 越接近 U_1 的导数。

由(3)式可知原负序电流增量元件, 叫负序电流微分元件较为合适。

对正弦波(非正弦波用傅里叶级数来代表)而言, 则电阻与容抗的关系可用不等式表达:

$$R_2 \ll \frac{1}{C\omega}$$

对50HZ来讲, ZQ—1不满足不等式, R_2 值有些偏大, LFL—1/G能满足不等式, R_2 值较为合适。

用时间常数表示:

$$R_2 C \leq \frac{1}{\omega}, \tau \ll \frac{1}{\omega}$$

则:
$$U_2 = \tau M \frac{dI_2}{dt} \dots\dots\dots (4)$$

输入电压改变得越剧烈, 微分电路应具有的时间常数应越小, 才能在输出端得到形状近似于所加电压的导数的电压。但是, 随着时间常数的减小, 则输出电压也相应的减小。换句话说, 我们越是希望得到准确的输入电压的导数, 则得到的输出电压越小。因此, 必须合理的选择微分电容器的容量和继电器线圈的电阻值。

2 微分电容器容量的选择

根据执行元件极化继电器的固有动作时间来决定时间常数, 以ZQ—1型为例。

已知: 极化继电器的动作时间为3~5毫秒。

极化继电器的线圈电阻为760欧姆。

即可算出C值:

$$C = \frac{\tau}{R_2} = \frac{(3 \sim 5) \text{ms}}{760 \Omega} = (3.95 \sim 6.58) 10^{-6} \cdot f = (3.95 \sim 6.58) \mu f$$

当 R_2 为常数时, C越大, τ 也越大, 则输出端电压脉冲越宽, 则继电器动作越可靠, 为此需要增大 τ 值。取2倍的可靠系数,

则:
$$\tau = 2(3 \sim 5) \text{ms} = (6 \sim 10) \text{ms}$$

$$C = \frac{(6 \sim 10) \text{ms}}{760 \Omega} = (7.9 \sim 13.16) \mu f = (8 \sim 13) \mu f$$

ZQ—1 取 $C = 10 \mu f$,

则:
$$\tau = R_2 C = 10 \times 10^{-6} \times 760 = 7.6 \text{ms}$$

因 $\tau < 10 \text{ms}$, 时间常数小于半个周波出现的时间。经整流后的脉冲波形为图—3所示:

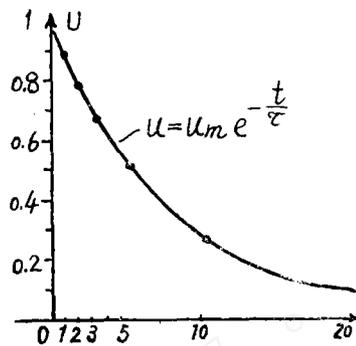


图3 极化继电器线卷上电压波形图(加100HZ滤波器)

当 τ 值大到一定程度, 输出电压就不是输入电压的导数, 对判别振荡就不准确。

3 放电电阻值的选择

由微分电容、放电电阻、极化继电器线卷电阻组成的放电回路, 当输入电压等于零时, 则 U_c 通过 R_1 、 R_2 放电。实践表明, 放电回路的时间常数0.5秒为宜。

$$R_1 = \frac{\tau}{C} = \frac{0.5^s}{10 \times 10^{-6} f} = 50000^{\Omega} = 50^k,$$

当放电时间常数越小, 对于躲振荡和强返返回均不利。ZQ-1型选 48^k , 再加上极化继电器线卷电阻 760^{Ω} , 比较合适。

二、异常运行分析

就系统振荡、非全相运行, 谐波分量进行分析。

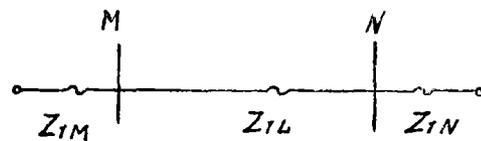


图4 系统阻抗图

1 系统振荡:

设: $E' = E'_M = E'_N$

$$\Delta E' = E'_M - E'_N = 2E$$

在两倍不平衡电压作用下, 便产生均衡电流, 称为振荡电流。

$$I = \frac{2E}{Z_{1\Sigma}} \sin \frac{\delta}{2} = \frac{2E}{Z_{1\Sigma}} \sin \frac{\omega_c t}{2}$$

..... (5)

当 $\delta = 180^\circ$ 时, 不平衡电压最大, 此时振荡电流同时出现最大值。

$$\text{即 } I_{Max} = \frac{2E}{Z_{1\Sigma}}$$

式中: $Z_{1\Sigma}$ —两侧电源间的正序阻抗 ($Z_{1\Sigma} = Z_{1M} + Z_{1L} + Z_{1N}$)

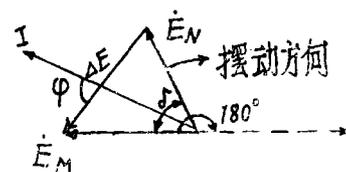


图5 向量图

δ —两侧电势间相角差 ($\delta = \omega_c t$)

ω_c —两侧发电机角频率差 ($\omega_c = \omega_M - \omega_N$)

将(5)式微分得:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{2E}{Z_{1\Sigma}} \cdot \frac{\omega_c}{2} \cos \frac{\omega_c t}{2} \dots\dots\dots (6) \quad (\text{安/秒})$$

此式即可求出振荡电流的变化速度。取 ω_c 等于常数, 当 $\cos \frac{\omega_c t}{2} = 1$ 时, 则 $\frac{dI}{dt}$ 有最大值, 即电流变化速度最高。其中, $t = \frac{2\pi K}{\omega_c}$, K 为整数或零。整理得:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{2E}{Z_{1\Sigma}} \cdot \frac{\omega_c}{2} = \omega_c \frac{E}{Z_{1\Sigma}} \dots\dots\dots (7)$$

其中, $\omega_c = 2\pi f_c = \frac{2\pi}{T_c}$,

$T_c = \frac{2\pi}{\omega_{c\text{min}}}$ 为振荡周期,

取最小振荡周期计算振荡电流变化速度。例如, 取 $T_c = 0.15$ 秒

$$\omega_c = \frac{2\pi}{T_c} = \frac{2 \times 3.14}{0.15} = 41.8$$

将 ω_c 代入(7)式中即可算出振荡电流变化速度。由(7)式可知振荡电流变化速度的大小, 取决于角频率和幅值的大小。

(1) 比较短路电流与振荡电流的角频率:

短路时, 短路电流的角频率接近正常时负荷电流的角频率。

即 $\omega_{DL} = 2\pi f = 2 \times 3.14 \times 50 = 314$

振荡时, 以某系统出现的最小振荡周期 0.08 秒计算。

$$\omega_c = 2\pi f_c = \frac{2\pi}{T_c} = \frac{2 \times 3.14}{0.08} = 78.5$$

从计算数据看, 振荡电流的角频率远远小于短路电流的角频率。

(2) 比较振荡电流与短路电流的幅值:

振荡电流的最大幅值为 $I_{max} = \frac{2E}{Z_{1\Sigma}}$

三相短路电流的最大幅值为

$$I_{DL}^{(3)} = -\frac{E}{Z_{1\Sigma} + ce} - \frac{r}{L} t$$

以三相短路为例, 假设: 电路中无电容, 电源功率为无限大。三相完全相同, 所以只取一相进行讨论。

$$\begin{aligned} u_a &= i_a r_\Sigma + L_\Sigma \frac{di_a}{dt} + M \frac{di_b}{dt} + M \frac{di_c}{dt} \\ &= i_a r_\Sigma + L_\Sigma \frac{di_a}{dt} + M \frac{d(i_b + i_c)}{dt} \end{aligned}$$

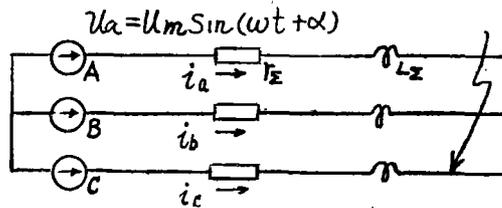


图 6 三相短路线路图

$$\begin{aligned}
 &= i_a r_{\Sigma} + L_{\Sigma} \frac{di_a}{dt} - M \frac{di_a}{dt} \\
 &= i_a r_{\Sigma} + (L_{\Sigma} - M) \frac{di_a}{dt} \\
 &= i_a r_{\Sigma} + L_{DL} \frac{di_a}{dt} \dots \dots \dots (8)
 \end{aligned}$$

写成通式: $U = ir + L \frac{di}{dt} \dots \dots \dots (9)$

解微分方程: $i = \frac{U_m}{Z_{1\Sigma}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{DL}) + ce^{-\frac{rt}{L}} \dots \dots \dots (10)$

- 式中: $Z_{1\Sigma}$ —每相综合阻抗
 φ_{DL} —短路电流与电势间相角
 $\alpha - t = 0$ 时电势合闸角
 ω —角频率
 C —常数, 其值由起始条件决定

在 $t = 0$ 时, $\omega t = 0$, 忽略负荷电流影响时(即空载), 电势合闸角也就无意义, 又因短路时阻抗为电感性, $\varphi_{DL} \doteq 90^\circ$, 则幅值为:

$$\begin{aligned}
 i &= -\frac{U_m}{Z_{1\Sigma}} + ce^{-\frac{rt}{L}}, U \doteq E \\
 i &= -\frac{E_m}{Z_{1\Sigma}} + ce^{-\frac{rt}{L}}
 \end{aligned}$$

一般情况下振荡时的 $Z_{1\Sigma}$ 与短路时的 $Z_{1\Sigma}$ 不相等, 短路时小。

从幅值上看, 短路电流比振荡电流多一项非周期分量, 所以振荡电流的幅值小于短路电流的幅值。

综上所述, 结论是振荡电流的变化速度远远小于短路电流的变化速度。在振荡时即或负序电流滤过器出现不平衡输出, 则负序电流微分元件也不会启动。

2 非全相运行

非全相运行是不对称运行的特殊情况, 即输电线路或变压器切除一相或两相运行的工作状态。

在对称的三相中切除一相时, 切除相电流不能突变到零值, 整个系统中的电磁元件, 便产生一个反电势来阻止被切除相电流的减少, 由正常运行状态过渡到非全相运行状态的时间由系统中电磁元件的时间常数及断路器的灭弧速度所决定。所以, 切除相电流减少到零值是有时间的, 也就是说电流变化速度较缓慢。切除相电流减少的过程, 也就是负序电流滤过器的负序电流分量增加的过程, 所以说负序电流增加的速度是缓慢。故负序电流微分元件不会启动。

3 五次谐波分量

在系统中出现五次谐波分量时，负序电流滤过器产生较大的输出。五次谐波分量比基波分量的角频率高五倍，因此电流变化速度较大，虽然半个周波出现的时间仅2毫秒，但是经过微分电路后脉冲已展宽，试验表明，微分元件能可靠动作。根据系统五次谐波分量的情况，来决定是否采用五次谐波滤过器。

三、故障分析

1 对称性故障

对称性故障时，无负序电流分量。但对称性故障一般产生较大的短路电流值，其中非周期分量也较大，在电流互感器中产生过渡过程，由三相电流互感器的过渡过程不同，而在二次侧产生较大的不平衡电流，并以三次谐波为主，通过零序电流滤过器输入微分元件中，而启动执行元件，以此反映对称性故障。

2 非对称性故障

单相接地短路、两相接地短路、两相短路均产生较大的负序电流分量。通过负序电流滤过器输入微分元件中，启动执行元件。能够很满意的反映非对称性故障。

3 微分元件电流动作速度（互感器二次值0.25刻度）

ZQ—1型元件为例。从整流器交流侧加电压测出执行元件动作电压为5伏特（未加助磁），考虑助磁占动作电流的50~60%后：

$$U_{ZD} = 0.5 \times 5 = 2.5V,$$

负序电流动作速度：

已知： $C = 10 \mu f$ ， $R_2 = 760 \Omega$ ， $M = 12 \Omega$ ，

$$\text{则，} \frac{dI_2}{dt} = \frac{U_{ZD}}{R_2 C M} = \frac{2.5}{760 \times 10 \times 10^{-6} \times 12} = 27.5 \text{安/秒} = 27.5 \text{毫安/毫秒}$$

通过对PLH—11型距离保护的改制工作，对负序电流微分元件有点肤浅的认识，由于水平有限，错误之处在此难免，请多提宝贵意见。

参考文献是9页。

参考文献：

1. 东北220千伏系统距离保护的运行分析和改进（东北电管局）
2. PLH—11/B继电保护屏检验规程（陕西省电管局）
3. 脉冲技术（高教课本上册，米耶罗维奇）
4. 输电线新型距离保护（盖文科）
5. 电力系统继电保护（许敬贤 张道民）
6. ZQ—1型增量元件（许昌继电器研究所）