

正序电压作用下，频率变化对阻容式三相负序电压滤过器工作的影响

河南省电业局试验所 周恭夫 郭广贤

许昌继电器厂生产的PGL型故障录波屏中采用LHQ—1型复合起动继电器作为非对称性故障的起动元件。该型继电器以负序电压为主零序电流为付作为起动量。负序电压依靠阻容式三相负序电压滤过器获得。滤过器的输入端接入相间电压 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} ，这就使得它不反映零序电压，同时由于它的参数选择又保证能够很好地滤除正序电压。LHQ—1型继电器具有运行方式灵活（可在“稳态”或“增量”位置下运行）、动作快速和接线简单等优点，但是由于目前电力供应比较紧张，电网经常处于低频率下运行，这种情况对滤过器工作的影响如何？是使用单位比较关心的问题。本文拟就这个问题谈一些粗浅的看法。

一、阻容式三相负序电压滤过器的工作原理

阻容式三相负序电压滤过器的接线如图1所示，在其输入端接入相间电压 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} 。为了滤除正序电压，滤过器各臂的参数应该满足以下四个条件：

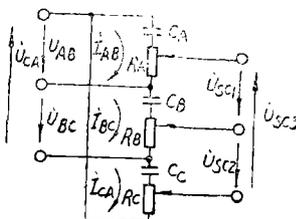


图 1

$$C_A = C_B = C_C = C, \text{ 即 } X_{CA} = X_{CB} = X_{CC} = X_C \quad (1)$$

$$R_A = R_B = R_C = R, \quad (2)$$

$$\text{在额定频率50赫时 } R = \sqrt{3} X_C \quad (3)$$

$$\text{分别经 } R_A、R_B、R_C \text{ 的 } \frac{1}{3} \text{ 处引出作为输出端。} \quad (4)$$

二、正序电压作用下，滤波器输出电压与电网频率变化的关系 滤波器各个臂的阻抗相等，即皆为：

$$y = R - jx_c = ze^{-j\varphi} \quad (7)$$

其中： $z = \sqrt{R^2 + x_c^2}$ 称为 Z 的模值， $\varphi = \arctan \frac{1}{2\pi fCR}$ 称为 Z 的幅角。

当电网频率变化时， y 和 φ 都要随之发生变化。根据滤波器的设计，在额定频率 $f_c = 50$ 赫时， $R = \sqrt{3}x_c$ ，此时的 $\varphi = 30^\circ$ 。当频率 $f < f_c$ 时， x_c 随着 f 的减小而增大，这就相当于图 2 中的 D, E, F 点将分别沿着各自所在的半园周 $\widehat{ADB}, \widehat{BEC}, \widehat{CFA}$ 向反时针方向移动，此时的 φ 就要大于 30° ，可以写成 $\varphi = 30^\circ + \alpha$ 。当频率 $f > f_c$ 时， x_c 随着 f 的增高而减小，这相当于图 2 中的 D, E, F 点将分别沿着半园 $\widehat{ADB}, \widehat{BEC}, \widehat{CFA}$ 向顺时针方向移动，此时的 φ 角就小于 30° ，可以写成 $\varphi = 30^\circ - \alpha$ 。

如果把电压 \dot{U}_{AB} 作为参考向量，则作用在滤波器输入端的一组正序电压可表示为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= Ue^{j0} \\ \dot{U}_{BC} &= Ue^{-j120^\circ} \\ \dot{U}_{CA} &= Ue^{j120^\circ} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

滤波器各臂内的电流表达式为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{AB} &= \frac{\dot{U}_{AB}}{Z} = \frac{U}{y} e^{j\varphi} \\ \dot{I}_{BC} &= \frac{\dot{U}_{BC}}{Z} = \frac{U}{y} e^{j(\varphi-120^\circ)} \\ \dot{I}_{CA} &= \frac{\dot{U}_{CA}}{Z} = \frac{U}{y} e^{j(\varphi+120^\circ)} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

1. 当 $f < f_c$ (此时 $\varphi = 30^\circ + \alpha$) 时，滤波器输出的空载不平衡电压，根据式(5)分别为：

$$\begin{aligned} \dot{U}_{sc1} &= \frac{1}{3} \dot{I}_{AB} R_A + \frac{1}{3} \dot{I}_{BC} R_B + \dot{I}_{BC} x_c e^{-j90^\circ} \\ &= \frac{2}{3} \frac{U}{Z} R e^{j\varphi} + \frac{1}{3} \frac{U}{Z} R e^{j(\varphi-120^\circ)} + \frac{U}{Z} x_c e^{j(\varphi-120^\circ)} \\ &= \frac{U}{Z} \left[\frac{2}{3} R e^{j(30^\circ+\alpha)} + \frac{1}{3} R e^{j(\alpha-90^\circ)} + x_c e^{j(\alpha-180^\circ)} \right] \end{aligned}$$

(利用 $e^{j\alpha} = \cos\alpha + jsin\alpha$ ，把上述指数式变为三角式后，经过化简)

$$= \frac{U}{Z} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} R - x_c \right) e^{j\alpha} \quad (10)$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{sc2} &= \frac{2}{3} \dot{I}_{BC} R_B + \frac{1}{3} \dot{I}_{CA} R_C + \dot{I}_{CA} x_C e^{-j90^\circ} \\ &= \frac{U}{Z} \left[\frac{2}{3} R e^{j(\alpha-90^\circ)} + \frac{1}{3} R e^{j(\alpha+150^\circ)} + x_C e^{j(\alpha+90^\circ)} \right]\end{aligned}$$

[同上, 把指数式变为三角式后, 化简, 并注意到 $-\sin\alpha + j\cos\alpha = \cos(90^\circ + \alpha) + j\sin(90^\circ + \alpha)$

$$= \frac{U}{Z} \left[\left(\frac{1}{2} x_C - \frac{1}{2\sqrt{3}} R \right) e^{j\alpha} + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} x_C - \frac{1}{2} R \right) e^{j(90^\circ + \alpha)} \right] \quad (11)$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_{sc3} &= \frac{2}{3} \dot{I}_{CA} R_C + \frac{1}{3} \dot{I}_{AB} R_A + \dot{I}_{AB} x_C e^{-j90^\circ} \\ &= \frac{U}{Z} \left[\frac{2}{3} R e^{j(\alpha+150^\circ)} + \frac{1}{3} R e^{j(\alpha+30^\circ)} + x_C e^{j(\alpha-90^\circ)} \right]\end{aligned}$$

[同样地把指数式变为三角式后, 化简, 并注意到 $\sin\alpha - j\cos\alpha = \cos(\alpha - 90^\circ) + j\sin(\alpha - 90^\circ)$]

$$= \frac{U}{Z} \left[\left(\frac{1}{2} x_C - \frac{1}{2\sqrt{3}} R \right) e^{j\alpha} + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} x_C - \frac{1}{2} R \right) e^{j(\alpha-90^\circ)} \right] \quad (12)$$

令 $K = \frac{1}{\sqrt{3}} R - x_C$, 则式(10)、(11)、(12)可以写成:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{sc1} &= \frac{U}{Z} K e^{j\alpha} \\ \dot{U}_{sc2} &= \frac{U}{Z} \left[\left(-\frac{1}{2} K \right) e^{j\alpha} + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} K \right) e^{j(90^\circ + \alpha)} \right] \\ \dot{U}_{sc3} &= \frac{U}{Z} \left[\left(-\frac{1}{2} K \right) e^{j\alpha} + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} K \right) e^{j(\alpha-90^\circ)} \right]\end{aligned} \quad (13)$$

2. 当 $f > f_c$ 时, 仿上述推导, 只是注意此时的 $\varphi = 30^\circ - \alpha$, 可以得出滤波器输出的不平衡电压的表达式为:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{sc1} &= \frac{U}{Z} K e^{-j\alpha} \\ \dot{U}_{sc2} &= \frac{U}{Z} \left[\left(-\frac{1}{2} K \right) e^{-j\alpha} + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} K \right) e^{j(90^\circ - \alpha)} \right] \\ \dot{U}_{sc3} &= \frac{U}{Z} \left[\left(-\frac{1}{2} K \right) e^{-j\alpha} + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} K \right) e^{-j(\alpha+90^\circ)} \right]\end{aligned} \quad (14)$$

3. 讨论

(a) (13)和(14)式所表达的输出不平衡电压构成一组对称向量, 这说明只要频率偏离了额定值, 在滤波器的输出端就会出现一组不平衡电压, 它们的模值相等, 幅角互差 120° 。

(b) 当 $f = f_c$ 时, $\because R = \sqrt{3} x_C, \therefore K = 0$, 即滤波器没有不平衡电压输出。当 $f \neq f_c$ 时, $|f - f_c|$ 的值越大, 输出不平衡电压也越大。

(c) 根据式(13)、(14)可以计算出当滤波器的电源电压 $U = 100$ 伏不变时, 由于 f 的变化, 滤波器输出不平衡电压之值, 计算结果列于表 1。

(d) 考虑到由于调整试验方面的误差；即使在额定频率下，滤波器也会出现不平衡电压，其值一般在1伏左右。如果继电器整定在“稳态”和3V”位置（此时滤波器的输出为 $3\sqrt{3} = 5.2$ 伏时继电器就动作），经表1数据可以看出，当频率降低至46赫及以下时，继电器就可能会误动作。但是在无故障情况下频率降低如此严重的情况是比较少见的。因此，可以说，单纯由于系统频率下降引起继电器误动作的可能性是比较小的。

表 1

电源频率 f (赫)	电源电压 U (伏)	每臂电阻 R (欧)	每臂容抗 x_c (欧)	每臂阻抗 y (欧)	每臂阻抗角 φ (度)	α (度)	输出不平衡电压 (伏)
52	100	1385	765.17	1582.3	29°	-1°	2.23
51	100	1385	780.17	1589.6	29.4°	-0.6°	1.25
50	100	1385	795.77	1597.3	30°	0°	0
49.5	100	1385	803.81	1601.4	30.1°	0.1°	0.24
49	100	1385	812.01	1605.5	30.4°	0.4°	0.75
48	100	1385	828.93	1614.1	30.9°	0.9°	1.79
47	100	1385	846.57	1623.2	31.4°	1.4°	2.87
46	100	1385	865	1632.9	32°	2°	3.98
45	100	1385	884.64	1643.4	32.6°	2.6°	5.15