

# 带并补电抗器超/特高压输电线路 单相瞬时故障拍频特性研究

邵文权, 南树功, 章霄微, 李彦斌

(西安工程大学 电气工程系, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 以带并联电抗器补偿的线路为研究对象, 深入剖析了单相瞬时故障消失后产生拍频现象的机理和条件, 探讨了瞬时故障低频自振分量的频率及幅值衰减特性, 以及断开相电气量无显著拍频现象产生的条件。研究表明: 故障电气量中产生明显拍频现象的条件为瞬时故障且电弧可靠熄灭, 但部分瞬时故障由于工频和低频量幅值差过大、频差过小或低频自振分量幅值衰减过快, 导致断开相电压与电抗器电流没有明显拍频现象, 此时可采用非拍频特征判据实现故障性质识别。大量 ATP 仿真与物理实验模型仿真验证了上述理论分析的正确性。

**关键词:** 自适应重合闸; 并联电抗器; 瞬时故障; 拍频; 特高压输电; 超高压输电

**中图分类号:** TM 73

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.05.011

## 0 引言

超/特高压线路故障以单相瞬时性故障为主要形式。为保证电网供电的持续性与可靠性, 国内外广泛采用单相重合闸技术<sup>[1]</sup>。但现有固定时限的重合闸存在盲目重合于未熄弧或永久性故障的危险, 采用自适应重合闸可有效解决这一问题<sup>[2-3]</sup>。

同时, 现代大容量超/特高压电网通常配置一定数量的电抗器以补偿线路电容电流和稳定运行电压, 一方面并联电抗器的引入改变了输电线路瞬时故障时的某些电气量特征<sup>[4]</sup>, 导致利用耦合电压幅值相位特征的判据难以得到有效利用<sup>[5-6]</sup>; 另一方面中性点小电抗的引入加速了潜供电弧的熄灭, 增加了电弧特性判别方法应用难度<sup>[7]</sup>。针对带并联电抗器线路故障性质的识别包括 2 类: 利用断开相恢复电压的能量熵判据<sup>[8]</sup>、积分判据<sup>[9]</sup>、包络线最大值与最小值的差值判据<sup>[10]</sup>和比值判据<sup>[11]</sup>; 利用测量精度高的并联电抗器电流特征的相关判据<sup>[12-15]</sup>。目前多数瞬时故障的判别方法通常认为瞬时性故障必有显著拍频特征, 但本文通过理论分析和相关仿真表明部分瞬时故障恢复电压阶段故障电气量不具有明显的拍频现象。本文从深入剖析瞬时性故障拍频现象产生机理入手, 分析了低频自振分量频率及衰减特性, 探讨了瞬时故障断开相电压或并联电抗器电流无显著拍频现象的条件, 为进一步有效利用拍频特征实现自适应重合闸瞬时故障的可靠识别提供依据。

收稿日期: 2013-06-19; 修回日期: 2014-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51207119); 陕西省教育厅科研计划资助项目(12JK0572); 西安工程大学博士启动基金资助项目(BS1018)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51207119), Scientific Research Program of Shaanxi Provincial Education Department(12JK0572) and Doctoral Foundation of Xi'an Polytechnic University(BS1018)

## 1 瞬时性故障拍频机理分析

### 1.1 拍频现象产生条件

输电线路发生单相故障, 线路两端断路器跳闸且瞬时故障熄弧后, 线路转入两相运行状态, 由于相间电容和相间互感的存在, 断开相端电压工频分量由电容耦合电压和电感耦合电压两部分组成<sup>[2]</sup>。在带并联电抗器的高压线路上, 线路储能元件存储的电磁能量在由电抗器、线路电感、相间互感、相对地电容、相间电容所组成的自振网络中充放电产生低频自振分量, 且受网络电阻的影响呈现衰减形式<sup>[11]</sup>。因此, 带并联电抗器单相瞬时故障恢复电压阶段, 断开相端电压  $u(t)$  和并联电抗器电流  $i(t)$  可表示为式(1)所示形式。

$$\begin{cases} u(t) = U_1 \sin(\omega_1 t + \theta_{u1}) + U_2 e^{-\sigma t} \sin(\omega_2 t + \theta_{u2}) \\ i(t) = I_1 \sin(\omega_1 t + \theta_{i1}) + I_2 e^{-\sigma t} \sin(\omega_2 t + \theta_{i2}) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $U_1, I_1, \omega_1$  分别为工频分量电压、电流、角频率;  $U_2, I_2, \omega_2$  分别为低频自振分量电压、电流、角频率;  $\theta_{u1}, \theta_{i1}$  分别为工频电压、电流初相位;  $\theta_{u2}, \theta_{i2}$  分别为低频自振分量的电压、电流初相位;  $\sigma$  为低频自振分量衰减因子。

当衰减因子  $\sigma \rightarrow 0$ , 即在较短时间内可以近似忽略低频自振分量幅值衰减的影响, 则有:

$$\begin{cases} u(t) = U(\omega_0 t) \sin(\omega_1 t + \theta_u) \\ i(t) = I(\omega_0 t) \sin(\omega_1 t + \theta_i) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} U(\omega_0 t) = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1 U_2 \cos(\omega_0 t + \theta_{u0})} \\ I(\omega_0 t) = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos(\omega_0 t + \theta_{i0})} \\ \omega_0 = \omega_1 - \omega_2 \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $U(\omega_0 t), I(\omega_0 t)$  分别为断开相端电压和并联电抗器电流量对应的正弦交变包络线的幅值;  $\omega_0$  为正弦交变包络线的振荡角频率。由式(2)可知, 断开相

端电压和并联电抗器电流产生明显拍频特征需要满足以下条件。

a. 2 种周期信号的频率具有较大的差异,即包络线的振荡角频率  $\omega_0$  不能过小。若低频自振分量角频率  $\omega_2$  十分接近工频  $\omega_1$ ,则振荡角频率  $\omega_0 \rightarrow 0$ ,对应的正弦交变包络线振荡周期  $T_0 = 2\pi/\omega_0 \rightarrow \infty$ ,近似无限长。如  $\omega_1 = 2\pi \times 50 \text{ rad/s}$ 、 $\omega_2 = 2\pi \times 49.5 \text{ rad/s}$ ,则振荡角频率  $\omega_0 = 2\pi \times 0.5 \text{ rad/s}$ ,振荡周期  $T = 2\pi/\omega_0 = 2 \text{ (s)}$ ,在较短数据窗(20~40ms)内无明显拍频现象。

b. 2 种周期信号都具有较大的幅值,即端电压和并联电抗器电流量中的工频分量和低频自振分量都具有较大的幅值。如果出现其中一种周期信号的幅值相对过小,此时电气量的特征由幅值大的周期信号确定,近似为单一周期信号,必然不会存在明显拍频现象。

以上分析表明,恢复电压阶段的电压/电流有无明显拍频现象与低频自振分量和工频分量在频率、幅值上的差异有直接关系。下面从瞬时故障时低频自振分量的频率和幅值特征入手,进一步剖析瞬时故障不产生拍频现象的机理和条件。

1.2 低频自振分量的频率特征

以两端带并联电抗器线路为例进行分析,对应网络集中参数等效电路如图 1 所示。图中,  $C_m$  为相间电容,  $C_N$  为相对地电容,  $R_1$ 、 $L_1$  分别为线路电阻和线路电感,  $L_m$  为单端并联电抗器  $L_p$  和中性点小电抗器  $L_n$  经等效后的相间电容补偿电感,  $L_0$  为等效后相对地电容补偿电感。

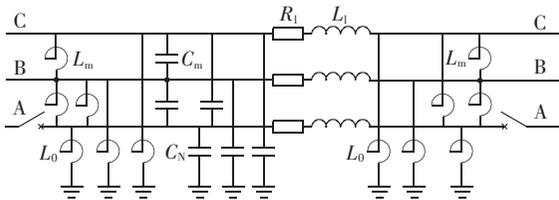


图 1 两端带并联电抗器线路等效电路  
Fig.1 Equivalent circuit of transmission line with shunt reactors at both ends

为了简化分析,本文均认为二次电弧在电弧电流为零时熄弧,故障点对地相当于开路,图 1 所示线路系统发生单相瞬时性故障且故障熄弧后的低频自振分量等效电路如图 2 所示。图中,  $u_c(0)$ 、 $i_L(0)$  分别为电弧熄灭瞬间电容电压和电感电流。需要指出是,由于受风速、气温等因素的影响,实际的二次电弧在电弧电流接近零时熄弧并不再重燃,此时故障熄弧点相当于一个幅值很小的等效电流源,对断开相低频自振分量影响甚微。

$$\begin{cases} R = R_1 + R_L / 2 \\ C = C_N + 2C_m \\ L = L_m L_0 / (2L_m + 4L_0) + L_1 \end{cases} \quad (4)$$

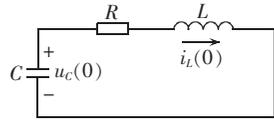


图 2 自振分量等效电路图  
Fig.2 Equivalent circuit of free oscillation component

其中,  $R_L$  为等效并联电抗器等值电阻。图 2 所示等效电路用式(5)方程描述:

$$LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \quad (5)$$

对应的特征根为:

$$p = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = \tau \pm j\omega_2 \quad (6)$$

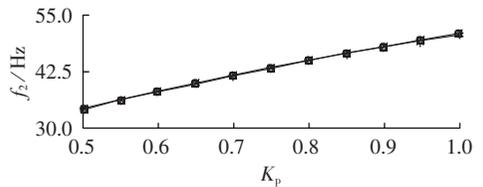
$$\tau = -\frac{R}{2L}, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$$

其中,  $\tau$  为衰减系数。忽略线路电阻和电感的影响,低频自振分量角频率可表示为式(7)所示形式:

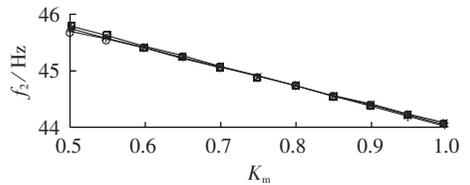
$$\omega_2 = \sqrt{\frac{2L_m + 4L_0}{L_m L_0 (C_N + 2C_m)}} = \sqrt{\frac{3K_p c_1 - K_m (c_1 - c_0)}{2c_1 + c_0}} \omega_1 \quad (7)$$

其中,并联补偿度  $K_p = 2/(\omega_1^2 L_p c_1)$ ;相间补偿度  $K_m = 2/(\omega_1^2 L_m C_m)$ ;  $c_0$ 、 $c_1$  分别为线路单位长度零序电容和正序电容。低频自振分量角频率  $\omega_2$  由线路单位长度电容参数和并联电抗器补偿度  $K_p$ 、相间电容补偿度  $K_m$  确定,与线路长度无关。

图 3 给出了不同电压等级输电线路低频自振分量频率  $f_2$  随并联补偿度、相间补偿度的变化曲线。



(a)  $f_2$  与  $K_p$  的关系 ( $K_m = 80\%$ )



(b)  $f_2$  与  $K_m$  的关系 ( $K_p = 80\%$ )

— 1000 kV, — 750 kV, — 500 kV, — 330 kV

图 3  $f_2$  与线路补偿度关系

Fig.3 Relationship between  $f_2$  and compensation degree

由图 3 可知,电压等级对低频自振分量频率影响甚微,在补偿度相同的情况下,不同电压等级线路的低频自振分量频率基本相同。由于 330~500 kV 输电线路并联电抗器补偿度一般为 0.6~0.8,可计算其低频自振分量频率一般低于 45 Hz,与工频分量的频差较大,具备产生显著拍频的频差要求;750~1150 kV 线

路的并联电抗器补偿度一般为 0.9~1.0,对应的低频自振分量频率十分接近工频 50 Hz。按照第 1.1 节的分析,低频自振分量与工频分量的频差过小,对应的包络线振荡周期可超过 1 s,对于目前 0.5~1.5 s 的重合时间内所利用的短数据窗(20~40 ms)内无明显拍频现象,为有效利用瞬时故障拍频特征带来困难。

### 1.3 低频分量幅值特征

#### 1.3.1 衰减特性

由第 1.2 节内容可知,低频自振分量的衰减系数  $\tau = -R/(2L)$ ,则衰减时间常数  $T=2L/R$ ,亦可写为:

$$T=2\frac{L_1+L_L}{R_1+R_L} \quad (8)$$

其中,  $L_L$  为等效并联电抗器等值电感。

设  $\varphi_1$  为线路阻抗角,  $\varphi_L$  为等效电抗器阻抗角,则衰减时间常数  $T$  可表示为:

$$T=\frac{L_1+L_L}{\pi f\left(\frac{L_1}{\tan\varphi_1}+\frac{L_L}{\tan\varphi_L}\right)} \quad (9)$$

其中,  $f$  为工频。若忽略线路电感和电阻,式(9)可化简为:

$$T=\frac{\tan\varphi_L}{\pi f} \quad (10)$$

由式(10)可以看出,衰减时间常数主要由并联电抗器品质因数决定,品质因数越高则衰减时间常数越大。衰减时间常数随电抗器阻抗角的变化如图 4 所示。

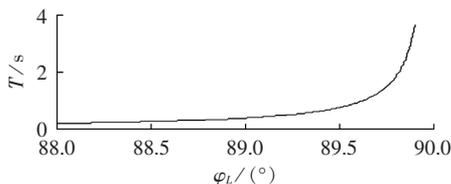


图 4 衰减时间常数与电抗器阻抗角关系

Fig.4 Relationship between attenuation time constant and reactor impedance angle

若设并联电抗器阻抗角  $\varphi_{LP}=89.9^\circ$ ,小电抗器阻抗角  $\varphi_{LN}=88.9^\circ$ ,  $K_p=K_m=70\%$ ,不同电压等级低频自振分量衰减时间常数随线路长度的变化曲线见图 5。

当线路补偿度固定时,低频自振分量衰减时间常数随线路长度的增加而减小;在相同的线路长度情况下,随着电压等级的提高,线路自电阻  $R_1$  越小

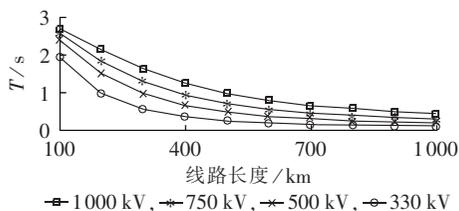
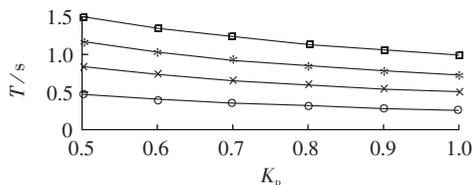


图 5 衰减时间常数与线路长度的关系

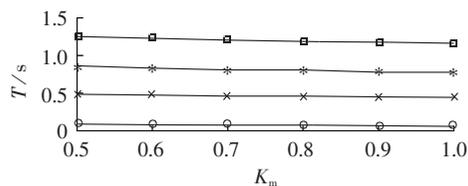
Fig.5 Relationship between attenuation time constant and different line length

而自电感  $L_1$  越大,衰减时间常数随电压等级提高而增大,与式(8)的理论推导一致。

若固定线路长度  $l=400$  km,设并联电抗器阻抗角  $\varphi_{LP}=89.9^\circ$ ,小电抗器阻抗角  $\varphi_{LN}=88.9^\circ$ ,不同电压等级低频分量衰减时间常数随线路补偿度的变化曲线如图 6 所示。



(a)  $T$  随  $K_p$  的变化( $K_m=70\%$ )



(b)  $T$  随  $K_m$  的变化( $K_p=70\%$ )

—■— 1000 kV, —\*— 750 kV, —×— 500 kV, —○— 330 kV

图 6 衰减时间常数与线路补偿度的关系

Fig.6 Relationship between attenuation time constant and compensation degree

由图 6 可知,对于确定的输电线路,线路自电阻  $R_1$  与自电感  $L_1$  固定,线路低频分量衰减时间常数随并联补偿度的增加而减小,相间补偿度对衰减时间常数的影响较小,与式(8)一致。在相同的补偿度下,电压等级越高,衰减时间常数越大。

因此,对于采用高补偿度并联电抗器的特高压长线路瞬时故障时低频自振分量的衰减时间在 1 s 以上,为重合期间有效利用低频自振分量提供较为有利的条件。

#### 1.3.2 幅值特性

目前文献一般认为,端电压低频自振分量的幅值接近或高于工频分量幅值<sup>[1]</sup>;文献[10]在忽略健全相电磁耦合影响的前提下,理论推导出  $U_1/U_2=\omega_1/\omega_2$  的结论;文献[4]对并联电抗器电流的低频自振分量电压、电流幅值特征进行了初步的仿真分析,构造了电压、电流的组合判据。经简单分析发现,当并联补偿度  $K_p$  和相间补偿度  $K_m$  满足一定关系时,断开相并联电抗器两端工频电压差接近 0,此时并联电抗器电流只存在低频分量,电抗器电流不存在拍频现象。为分析方便,先不考虑健全相对断开相电磁耦合影响,对应的断开相等值网络如图 7 所示,图中箭头表示两支路电流流向,  $U_N$ 、 $U_R$  分别为  $L_p$  两侧的节点电压。

当并联补偿度  $K_p$  和相间补偿度  $K_m$  一致时,此时断开相并联电抗器的工频电压近似为零,具体推导过程如下。

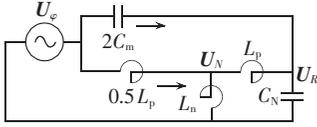


图 7 断开相等值网络

Fig.7 Equivalent circuit of tripped phase

$$\therefore K_p = K_m$$

$$\therefore \frac{1}{L_p C_1 \omega_1^2} = \frac{1}{L_m C_m \omega_1^2}, L_m = \frac{C_1}{C_m}$$

$$\text{而 } \frac{L_m}{L_p} = \frac{1}{L_p} \frac{L_p}{L_n} (L_p + 3L_n) = \frac{L_p}{L_n} + 3,$$

$$\frac{C_1}{C_m} = \frac{3C_m + C_N}{C_m} = \frac{C_N}{C_m} + 3$$

即得  $\frac{L_p}{L_n} = \frac{C_N}{C_m}$ , 进一步整理得:

$$\frac{0.5\omega L_p}{\omega L_n} = \frac{\omega C_N}{2\omega C_m} = \frac{1/(\omega C_m)}{1/(\omega C_N)}$$

其中,  $\omega = 2\pi f$ ,  $\omega$  为图 7 中电源角频率。

最后得  $U_N = U_R$ , 即断开相并联电抗器的工频电压差为零, 此时对应并联电抗器电流的工频周期性分量幅值为零, 仅有低频自振分量和衰减直流分量。在前述情况下, 断开相并联电抗器的两端电压工频分量相等, 相当于健全相的相间电容耦合电流全部流入断开相对地电容回路, 健全相的并联电抗器电流全部流入中性点小电抗器对地回路, 断开相并联电抗器电流为未衰减完全的非周期直流分量和低频自振分量。若考虑健全相电磁耦合的影响, 则并联电抗器补偿度和线路相间电容补偿度在一定范围内仍存在断开相并联电抗器电流工频分量为零的可能。

综上所述, 大多数情况下带并联电抗器输电线路发生单相瞬时故障时, 断开相端电压和并联电抗器电流有明显拍频现象产生, 但在以下几种情况下拍频现象不明显。

**a.** 当线路采用近全补偿方式运行时, 低频自振分量频率接近工频, 拍频周期较长, 断开相端电压、并联电抗器电流较短数据窗(20~40 ms)内无明显拍频现象。

**b.** 并补电抗器品质因数低, 低频分量衰减时间常数较小, 低频自振分量幅值衰减过快, 断开相端电压、并联电抗器电流拍频现象持续时间短暂。

**c.** 在并联补偿度和相间补偿度满足一定关系时使断开相并联电抗器两端的电压工频分量近似为零, 对应的电流的工频分量的幅值接近零, 仅有低频自振周期分量, 此时亦无拍频现象。

## 2 仿真实验验证

为验证上述理论分析的正确性, 利用 ATP 仿真和物理模型实验进行验证。

### 2.1 软件仿真

利用图 8 所示 1000 kV-600 km 输电线路系统进行 ATP 仿真实验验证。线路参数为:  $r_1 = 0.0758 \Omega/\text{km}$ ;  $r_0 = 0.1542 \Omega/\text{km}$ ;  $X_1 = 0.26365 \Omega/\text{km}$ ;  $X_0 = 0.83095 \Omega/\text{km}$ ;  $c_1 = 0.01397 \mu\text{F}/\text{km}$ ;  $c_0 = 0.009296 \mu\text{F}/\text{km}$ ; 电抗器  $X_{P1}$ 、 $X_{P2}$ 、 $X_{N1}$ 、 $X_{N2}$  的电抗由补偿度确定。

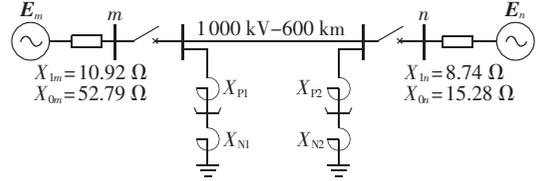
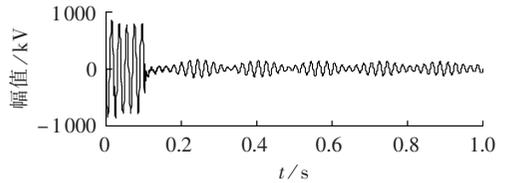


图 8 1000 kV-600 km 输电系统

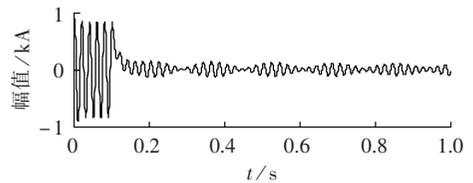
Fig.8 1000 kV-600 km transmission system

设并联电抗器阻抗角  $\varphi_{LP} = 89.9^\circ$ , 小电抗器阻抗角  $\varphi_{LN} = 88.9^\circ$ , 利用图 8 所示输电系统分别进行以下几种典型的瞬时性故障仿真。

**a.** 并联补偿度  $K_p = 80\%$ , 相间补偿度  $K_m = 85\%$ , 两侧电源电势相角差  $\theta = 30^\circ$ 。仿真结果如图 9 所示, 电气量如表 1 所示。



(a) 端电压



(b) 电抗器电流

图 9 仿真结果 ( $K_p = 80\%$ 、 $K_m = 85\%$ )

Fig.9 Simulative results ( $K_p = 80\%$ 、 $K_m = 85\%$ )

表 1 电气量主要分量 ( $K_p = 80\%$ 、 $K_m = 85\%$ )

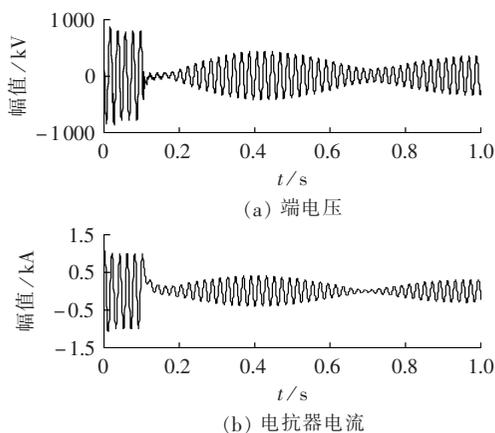
Tab.1 Main components of electrical variables ( $K_p = 80\%$ 、 $K_m = 85\%$ )

| 电气量   | 频率/Hz |      | 幅值    |       | 衰减常数/s   |      |
|-------|-------|------|-------|-------|----------|------|
|       | 工频分量  | 自振分量 | 工频分量  | 自振分量  | 工频分量     | 自振分量 |
| 端电压   | 50    | 43.8 | 90 kV | 68 kV | $\infty$ | 0.9  |
| 电抗器电流 | 50    | 43.8 | 75 A  | 74 A  | $\infty$ | 0.9  |

由图 9 可知, 一般情况下单相瞬时性故障恢复电压阶段存在明显拍频现象; 由表 1 可得, 低频分量频率小于工频, 衰减时间常数较大, 幅值也接近工频分量幅值。

**b.** 并联补偿度  $K_p = 95\%$ , 相间补偿度  $K_m = 80\%$ , 两侧电源电势相角差  $\theta = 30^\circ$ 。仿真计算结果如图 10 所示, 电气量如表 2 所示。

由图 10 和表 2 可知, 当并联补偿度接近全补偿

图 10 仿真结果 ( $K_p=95\%$ 、 $K_m=80\%$ )Fig.10 Simulative results ( $K_p=95\%$ 、 $K_m=80\%$ )表 2 电气量主要分量 ( $K_p=95\%$ 、 $K_m=80\%$ )

Tab.2 Main components of electrical variables

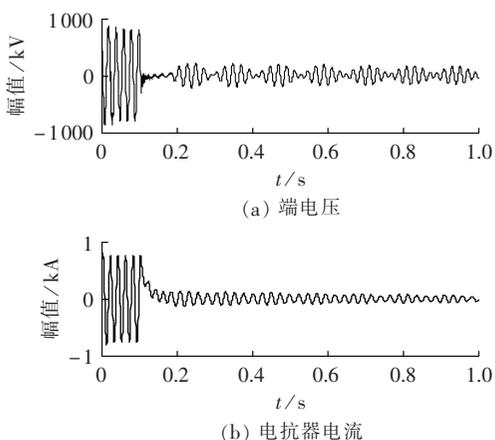
( $K_p=95\%$ 、 $K_m=80\%$ )

| 电气量   | 频率/Hz |      | 幅值     |        | 衰减常数/s   |      |
|-------|-------|------|--------|--------|----------|------|
|       | 工频分量  | 自振分量 | 工频分量   | 自振分量   | 工频分量     | 自振分量 |
| 端电压   | 50    | 48.2 | 234 kV | 248 kV | $\infty$ | 0.83 |
| 电抗器电流 | 50    | 48.2 | 189 A  | 274 A  | $\infty$ | 0.83 |

时,低频分量频率接近 50 Hz,恢复电压阶段拍频周期长达 0.5 s,在较短数据窗(20~40 ms)内拍频现象不明显。

c. 设并联补偿度与相间补偿度相等,如  $K_p=K_m=70\%$ ,两端电源电势相角差  $\theta=0^\circ$ 。仿真计算结果如图 11 所示,主要分量如表 3 所示。

由图 11 和表 3 知,若忽略健全相电磁耦合的影响(即电势角差  $\theta=0^\circ$ ),并联补偿度和相间补偿度相

图 11 仿真结果 ( $K_p=K_m=70\%$ )Fig.11 Simulative results ( $K_p=K_m=70\%$ )表 3 电气量主要分量 ( $K_p=K_m=70\%$ )Tab.3 Main components of electrical variables ( $K_p=K_m=70\%$ )

| 电气量   | 频率/Hz |      | 幅值     |        | 衰减常数/s   |      |
|-------|-------|------|--------|--------|----------|------|
|       | 工频分量  | 自振分量 | 工频分量   | 自振分量   | 工频分量     | 自振分量 |
| 端电压   | 50    | 41.4 | 106 kV | 121 kV | $\infty$ | 1    |
| 电抗器电流 | 50    | 41.4 | 14 A   | 121 A  | $\infty$ | 1    |

等时,端电压存在明显拍频现象,但并联电抗器电流工频分量幅值只有低频分量幅值的 10%,因此基本不存在拍频现象;与前节的理论分析基本一致。

## 2.2 物理实验仿真

由于实验室条件有限,以图 8 所示输电系统为原型系统,自行设计并建立了输电线路微型物理仿真系统,微型线路模型由 6 个  $\Pi$  型电路串联而成,采用 LabVIEW + MATLAB 进行故障数据录波与分析。物理仿真系统模型如图 12 所示, $\Pi$  线路模型结构如图 13 所示。

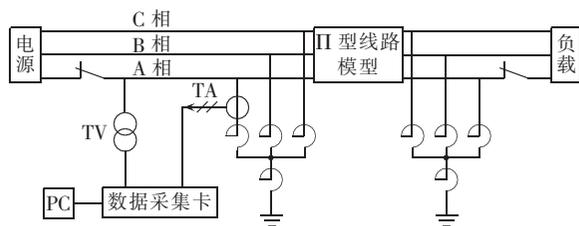


图 12 物理仿真系统

Fig.12 Physical simulation model

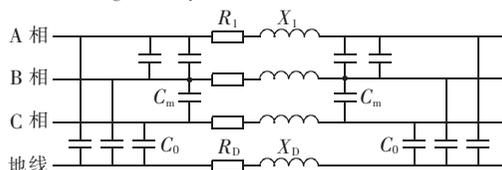
图 13 线路  $\Pi$  型模型Fig.13 Structure of  $\Pi$  model

图 13 中, $R_1$ 、 $X_1$ 、 $C_m$ 、 $C_0$  分别为经模型比例变换后的线路正序电阻、正序电感、相间电容和零序电容; $R_D$ 、 $X_D$  分别为比例变换后的接地电阻和零序补偿电感。

利用物理模型仿真系统进行 A 相瞬时故障实验,并联补偿度  $K_p=85\%$ ,相间补偿度  $K_m=90\%$ ,模型负荷电流  $I=0.53$  A(对应的原型系统负荷电流为 2120 A),仿真结果见图 14(数据采集卡以电压形式读取电抗器电流,其差分模式时的电压输入范围为

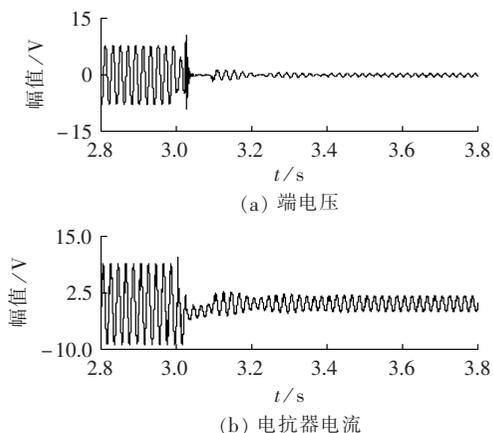


图 14 物理实验仿真录波

Fig.14 Recorded waveforms of physical experiment simulation

-10~+10 V)。

由图14可知,瞬时性故障时端电压和并联电抗器电流在恢复电压阶段初期均有拍频现象产生,但存在时间较短(约一个拍频周期)。对图14所示故障录波的主要分量分析结果如表4所示。

表4 电气量主要分量

Tab.4 Main components of electrical variables

| 电气量   | 频率/Hz |      | 幅值     |       | 衰减常数/s |       |
|-------|-------|------|--------|-------|--------|-------|
|       | 工频分量  | 自振分量 | 工频分量   | 自振分量  | 工频分量   | 自振分量  |
| 端电压   | 50    | 44   | 0.35 V | 1.2 V | 28     | 0.135 |
| 电抗器电流 | 50    | 44   | 1.70 V | 1.3 V | 41     | 0.143 |

从表4可知,瞬时性故障时端电压和电抗器电流存在幅值较大的低频自振分量,与理论分析基本一致。由于微型线路物理模型中的自制电抗器与实际的电抗器的阻抗角偏小、测量回路的信号衰减等因素,直接导致自振回路中的低频自振分量衰减过快,但不影响本文相关理论的定性分析。在后续研究工作中将进一步完善物理实验模型或利用现场录波数据进行相关理论的验证。

### 3 结论

本文针对带并补电抗器的线路深入分析了瞬时性故障拍频现象产生机理,研究了低频自振分量频率及衰减特性,为有效利用拍频特征提供了有益的理论基础。研究得出以下结论:

a. 带并联电抗器输电线路发生单相瞬时故障时,只有工频分量和低频自振分量的幅值和频率具有较大的差异时才产生明显的拍频现象,此时可利用拍频特性进行瞬时故障可靠识别;

b. 并联电抗器的品质因数直接影响低频自振分量衰减时间,当电抗器品质因数低时低频自振分量幅值衰减快速,断开相端电压、并联电抗器电流拍频现象持续时间短暂,将导致断开相端电压与电抗器电流没有明显拍频现象;

c. 针对特定补偿度关系下的断开相并联电抗器电流无拍频的现象,宜采用非拍频特征判据以实现瞬时故障的可靠识别。

### 参考文献:

[1] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社,2007:380-390.

[2] 石光,邵文权,郭耀珠,等. 带并联电抗器的超/特高压输电线路的单相重合闸新方案[J]. 电力自动化设备,2011,31(7):5-9. SHI Guang,SHAO Wenquan,GUO Yaozhu,et al. Single-phase adaptive reclose scheme for EHV/UHV transmission lines with reactors[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(7):5-9.

[3] 朱建红,陈福锋,魏曜,等. 新型同杆双回线自适应重合闸方案研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(4):47-51.

ZHU Jianhong,CHEN Fufeng,WEI Yao,et al. Study of self-adaptive reclosing for parallel lines[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(4):47-51.

[4] 邵文权,章霄微,宋江喜,等. 特高压交流输电线路单相重合闸无故障识别电压电流组合判据[J]. 高电压技术,2013,39(3):546-554. SHAO Wenquan,ZHANG Xiaowei,SONG Jiangxi,et al. Non-fault identification voltage and current based integrated criterion for single-phase reclosure on UHVAC transmission lines[J]. High Voltage Engineering,2013,39(3):546-554.

[5] 郑涛,刘敏,郭飞. 带并联电抗器中性点小电抗的选择及其对单相自适应重合闸的影响[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):62-67. ZHENG Tao,LIU Min,GUO Fei. Influence of neutral reactor on single-phase adaptive reclose[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):62-67.

[6] 成敬周,张举,焦彦军,等. 基于测度分析及模糊集理论的单相自适应重合闸研究[J]. 电力自动化设备,2005,25(4):23-27. CHENG Jingzhou,ZHANG Ju,JIAO Yanjun,et al. Study on single-pole adaptive reclosing based on fuzzy set and measure analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(4):23-27.

[7] 程玲,宋稀霖. 带并联电抗器的特高压输电线路故障性质识别[J]. 电网技术,2010,34(8):216-222. CHENG Ling,SONG Zilin. An approach to identify faults in UHV AC transmission line equipped with shunt reactor[J]. Power System Technology,2010,34(8):216-222.

[8] 张圆圆,龚庆武,陈道君,等. 基于小波包能量熵判别的高压输电线路单相自适应重合闸[J]. 电力自动化设备,2009,29(9):11-16. ZHANG Yuanyuan,GONG Qingwu,CHEN Daojun,et al. Single-phase adaptive reclosure based on wavelet packet energy for HV transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(9):11-16.

[9] 曹芬,何奔腾. 带并联电抗器的超高压输电线路单相自适应重合闸新算法[J]. 电力系统自动化,2009,33(23):55-59,107. CAO Fen,HE Benteng. New algorithm for single-phase adaptive reclosure of EHV transmission lines with shunt reactors[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(23):55-59,107.

[10] 陆岩,郑玉平,沈军,等. 超高压有并联电抗器线路无故障重合闸研究[J]. 电力系统自动化,2008,32(6):76-80. LU Yan,ZHENG Yuping,SHEN Jun,et al. Research on adaptive reclosure of EHV transmission lines with shunt reactors[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(6):76-80.

[11] 李斌,李永丽,盛鹏,等. 带并联电抗器的超高压输电线路单相自适应重合闸研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(5):52-56. LI Bin,LI Yongli,SHENG Kun,et al. The study on single-pole adaptive reclosure of EHV transmission lines with the shunt reactor[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(5):52-56.

[12] 张圆圆,龚庆武. 基于并联电抗器电流判别的超高压输电线路单相自适应重合闸[J]. 电力自动化设备,2009,29(7):75-78. ZHANG Yuanyuan,GONG Qingwu. Single-phase adaptive reclose of EHV transmission line based on shunt reactor current identification[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(7):75-78.

[13] 郑涛,刘敏,董淑惠. 基于故障相并联补偿电流变化特征的单相自适应重合闸[J]. 电力系统自动化,2011,35(10):74-78. ZHENG Tao,LIU Min,DONG Shuhui. Single-phase adaptive reclosure based on variation trend of decaying components of fault

phase shunt reactor currents[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 74-78.

[14] 石光, 邵文权, 郭耀珠, 等. 带并联电抗器输电线路单相故障识别判据[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 53-58.

SHI Guang, SHAO Wenquan, GUO Yaozhu, et al. Identification criterion of permanent single-phase fault for transmission lines with shunt reactors[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 53-58.

[15] 刘浩芳, 王增平, 刘俊岭. 带并补的超高压输电线路单相自适应重合闸新判据[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24): 62-66.

LIU Haofang, WANG Zengping, LIU Junling. A new criterion for single-phase adaptive reclosure of shunt reactor compensated EHV transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 62-66.

作者简介:



邵文权

邵文权(1978-), 男, 湖北竹山人, 副教授, 博士, 主要研究方向为输电线路继电保护及自适应重合闸(E-mail: swq0426@126.com);

南树功(1990-), 男, 甘肃定西人, 硕士研究生, 从事电力系统继电保护及其自动化装置方面的研究工作(E-mail: nanshugong@126.com);

章霄微(1987-), 男, 浙江嘉兴人, 硕士, 主要从事电力系统继电保护相关工作;

李彦斌(1975-), 男, 陕西西安人, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统继电保护教学及科研工作。

## Beat-frequency characteristics for single-phase transient fault of EHV/UHV transmission line with shunt reactor

SHAO Wenquan, NAN Shugong, ZHANG Xiaowei, LI Yanbin

(Department of Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The beat-frequency phenomena may occur after the single-phase transient fault of transmission line with shunt reactor is disappeared, the mechanism and conditions of which are deeply analyzed. The frequency and attenuation characteristics of low-frequency free oscillation component of transient fault and the conditions, under which no obvious beat-frequency phenomena will occur after the faulty phase are de-energized, are discussed. Results show that, the obvious beat-frequency phenomena will occur in faulty electrical variables only when the fault is transient and the arc is reliably extinguished. For some transient faults, if the difference between elementary- and low-frequency components is too big in amplitude and too small in frequency, or the low-frequency free oscillation component is quickly attenuated, no beat-frequency phenomena will occur in the voltage of tripped phase and the current of reactor, where the fault type can be identified by non-beat-frequency criteria. Simulative results of ATP and physical experiment model verify the correctness of theoretical analysis.

**Key words:** adaptive reclosure; shunt reactor; transient fault; beat-frequency; UHV power transmission; EHV power transmission

(上接第 71 页 continued from page 71)

## Optimal configuration and control of modular VRB-EC hybrid energy storage system

LI Junhui<sup>1</sup>, ZHU Xingxu<sup>1</sup>, YAN Gangui<sup>1</sup>, MU Gang<sup>1</sup>, WANG Zhiming<sup>2</sup>, LUO Weihua<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. Liaoning Province Electric Power Company of State Grid, Shenyang 110000, China)

**Abstract:** A control strategy for the HESS (Hybrid Energy Storage System) composed of all-VRB (Vanadium Redox flow Battery) and EC (Electrochemical Capacitor) is proposed, and the optimal quantity of configured ECs and the minimum cost of HESS are analyzed. The total charge/discharge power of HESS is designed based on the wind power forecast data, the EC action interval is set to reduce the loss of VRB, and the sorting method is applied to reasonably distribute the charging task for each VRB cell. According to the measured and forecasted data of a wind farm for 30 days, the influence of configured EC quantity on the HESS cost is simulated and analyzed, and the optimal quantity of configured ECs and the minimum cost of HESS are obtained, which can be referred during the engineering of VRB-EC HESS project for its operation mode design and EC configuration.

**Key words:** wind power; forecasting; energy storage; vanadium redox flow battery; electrochemical capacitor; group control; optimization