

## 带并补电抗线路电弧性故障固有频率特征研究\*

刘 媛 邵文权 夏经德

(西安工程大学电气工程系 西安 710048)

**摘要:**超/特高压输电线路发生电弧性故障时由于线路电容电感构成谐振回路会产生固有频率分量,利用并联电抗电流量的频率特征有助于实现线路保护的故障识别和重合闸的无故障判别。电弧性故障时先后经历一次电弧、二次电弧、恢复电压3个不同的物理阶段,各阶段分别由储能元件构成自振网络,由于各阶段自振网络结构的差异将产生不同的特征频率分量。通过相模变换实现三相耦合线路模量网络的固有特征频率的计算模型及特征分析,明确了利用并联电抗器电流的主要固有频率分量特征能够识别电弧性故障所处的物理阶段,为线路保护的故障识别和三相重合前的无故障判别提供有效的特征信息。最后 PSCAD 仿真分析结果表明,所分析的不同物理阶段的固有特征频率的相关理论的正确性,为下一步利用固有频率特征实现线路保护和重合闸方案提供了较好的理论基础。

**关键词:**输电线路;并联电抗器;固有频率;相模变换;傅里叶变换

**中图分类号:** TM773 TN751.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4051

## Analysis on inherent frequencies of transmission lines with shunt reactors in arc fault

Liu Yuan Shao Wenquan Xia Jingde

(Department of Electronic and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The fault current contains the inherent frequencies components when the arc faults occur in UHV transmission lines with shunt reactors, which can offer effective fault information. In the primary arc, secondary arc and recovery voltage periods in the case of an arc fault with shunt reactors, the three free oscillation circuits are formed by the energy storage elements in the different periods, which will produce different inherent oscillation frequency components based on the different network. After phase-mode transformation, the free oscillation circuits in mode components are obtained and the inherent frequencies are captured, the characteristics of inherent frequency components are used to recognize the condition of a arc fault, offering a theoretical basis for the new protection principle based on inherent frequencies. PSCAD simulation results show the correctness of the theoretical analysis on the inherent, provides a good theoretical basis for the line protection and reclosing scheme by using characteristics of inherent frequency.

**Keywords:** transmission line; shunt reactors; inherent frequency; phase-mode transformation; Fourier transform

### 1 引言

长距离、大容量输电已成为现代电力系统发展的必然选择,所以维持电力系统的安全稳定运行是一个非常重要的问题<sup>[1]</sup>。常规线路保护是基于工频量的保护,通过测量提取工频量在幅值和相角方面的特征构成保护原理,但由于其动作时间长易导致保护误动作。为此人们对特高压线路的暂态过程进行了大量的研究,试图找到更为合适的特高压输电线路的保护配置,文献[11-12]对固有频率的研究为暂态保护新原理提供了理论支持;文献[12]利用对

称分量变换对特高压输电线路故障时产生的固有特征频率进行了研究,为深入研究利用固有频率特征的线路保护提供了良好的思路。

带并补电抗的超/特高压长距离输电线路发生电弧性故障时的一次电弧、二次电弧及恢复电压阶段的自振网络结构存在较大差异,各阶段存在各自固有的主要特征频率分量。本文分析了特高压输电线路电弧性故障时各阶段电气量的固有频率特征,利用相模变换矩阵实现三相耦合线路模量网络的固有特征频率的计算及特征分析,明确了并抗器电流的固有频率分量能够有效区分线路故障后所

收稿日期:2015-12

\* 基金项目:西安工程大学博士启动基金(BS1018)项目资助

处物理阶段,为基于固有频率特征的线路保护和重合闸方案提供了新的理论支持。

## 2 电弧性故障时各阶段固有频率特征分析

输电线路发生电弧性故障时先后经历一次电弧、二次电弧和恢复电压阶段,电弧性故障的时序如图1所示。

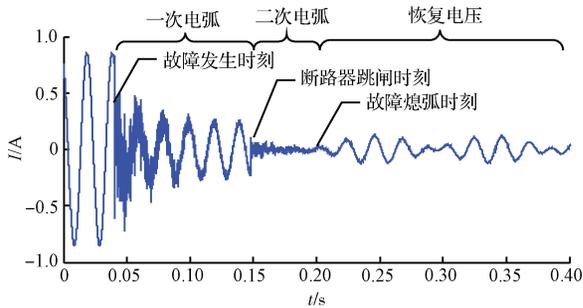


图1 电弧性故障时序

在一次电弧、二次电弧及恢复电压阶段由于线路电感、电容等储能元件的存在形成自振回路,分别如图2(a)~(c)所示。其中,  $Z_M$  和  $Z_N$  分别为线路M端和N端系统阻抗;  $pZ$  和  $(1-p)Z$  分别为故障点F距M侧和N侧线路等值阻抗;  $L_{n1}$  和  $L_{n2}$  分别为M侧和N侧并联电抗器电感;  $U_M^I$  和  $U_N^I$  分别为线路M端、N端在断路器跳开进入二次电弧瞬间的等值电势;  $U_F^I$ 、 $U_F^II$  和  $U_F^III$  分别为故障点F在各阶段的等值电势。

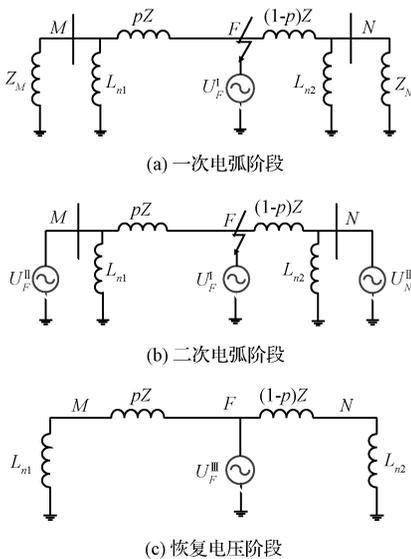


图2 简化自振网络示意

由图2可知,一次电弧阶段的等值自振网络中故障点F处存在等值电势  $U_F^I$ ;二次电弧阶段断路器跳闸瞬间,

系统端M侧、N侧的等值电势  $U_M^I$  和  $U_N^I$ ,故障点F处亦存在等值电势  $U_F^I$ ;恢复电压阶段为瞬时性故障熄弧后特有的自振回路,熄弧瞬间故障点F处存在等值电势  $U_F^II$ 。显然,线路电弧性故障时3个物理阶段的自振网络等值电源的数目和位置不同,且网络结构亦有较大的差异,导致相应的固有频率特征也存在差异。

为精确计算各物理阶段的固有频率,利用相模变换矩阵对三相线路解耦,由线模网络和零模网络独立网络计算分析。本文采用双  $\pi$  集中参数模型进行计算分析,经过多次反复计算与验证,充分表明该等效简化能够满足计算精度的要求。

接下来以三相故障为例,其电弧性故障的3个物理阶段模量下独立自振回路分别如图3~5所示。其中  $R_{M1}$ 、 $L_{M1}$ 、 $R_{N1}$ 、 $L_{N1}$  和  $R_{M0}$ 、 $L_{M0}$ 、 $R_{N0}$ 、 $L_{N0}$  分别为线路M端和N端系统正序、零序阻抗;  $R'_1$ 、 $L'_1$ 、 $C'_1$ 、 $R''_1$ 、 $L''_1$ 、 $C''_1$  和  $R'_0$ 、 $L'_0$ 、 $C'_0$ 、 $R''_0$ 、 $L''_0$ 、 $C''_0$  分别为线路M侧和N侧正序、零序电阻、电感、电容;  $L_{n1}$  和  $L_{n2}$  分别为线路M侧和N侧并联电抗器电感;  $U_{F1}^I(s)$ 、 $U_{F1}^{II}(s)$ 、 $U_{F1}^{III}(s)$  和  $U_{F0}^I(s)$ 、 $U_{F0}^{II}(s)$ 、 $U_{F0}^{III}(s)$  分别为故障点F在各阶段的线模、零模电压;  $U_{M1}^{II}(s)$ 、 $U_{N1}^{II}(s)$  和  $U_{M0}^{II}(s)$ 、 $U_{N0}^{II}(s)$  分别为二次电弧阶段线路M端和N端线模、零模电压。

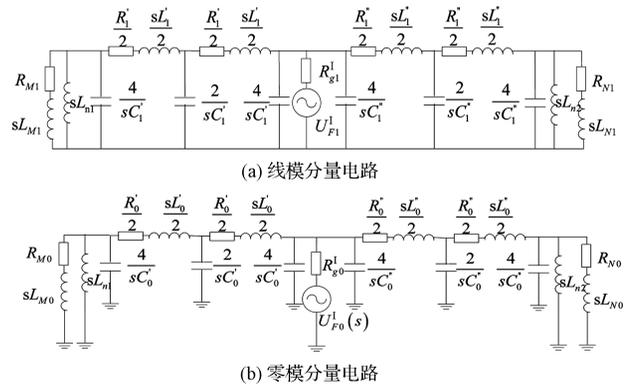


图3 一次电弧阶段拉普拉斯等效电路

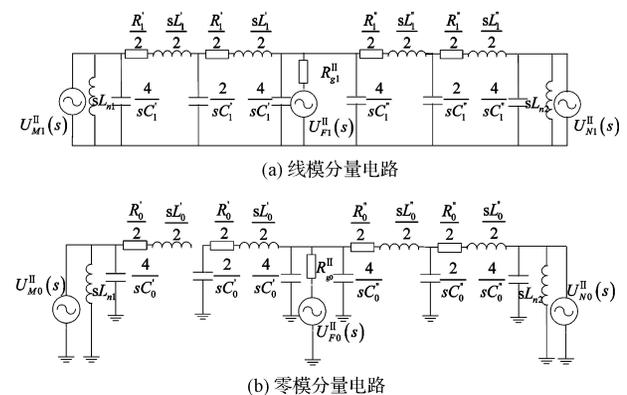


图4 二次电弧阶段拉普拉斯等效电路

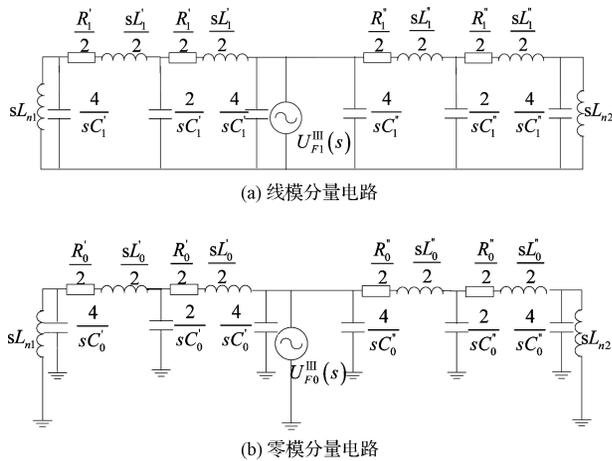


图5 恢复电压阶段拉普拉斯等效电路

利用电路定律求解图3~5中一次电弧、二次电弧和恢复电压的线模网络和零模网络特征方程,进而实现固有频率的计算。以恢复电压阶段为例,求其自振回路的等值阻抗  $Z_{III}(s)$  为:

$$Z_{III}(s) = \frac{P_{III}(s)}{Q_{III}(s)} \quad (1)$$

其特征方程  $Q_{III}(s)$  形如式(2):

$$k_{11}s^{11} + k_{10}s^{10}k_9s^9 + k_9s^8 + k_7s^7 + k_6s^6 + k_5s^5 + k_4s^4 + k_3s^3 + k_2s^2 + k_1s^1k_0s^0 = 0 \quad (2)$$

式中:  $k_{11}, k_{10}, k_9, k_8, k_7, k_6, k_5, k_4, k_3, k_2, k_1, k_0$  分别为特征方程  $Q_{III}(s)$  多项式各阶系数。

令式(2)所示的特征方程  $Q_{III}(s) = 0$  可求得形如  $s_k = -\alpha_k \pm j\omega_k$  的5组共轭特征根和  $s_0 = -\alpha_0$  的1个实数特征根。其中,由共轭特征根  $s_k = -\alpha_k \pm j\omega_k$  可直接确定恢复电压阶段的主要自振分量的频率信息。由于本文篇幅有限,一次电弧、二次电弧的自振网络的特征方程此处不再赘述。

本节通过详细分析线路发生电弧性故障时各个物理阶段的固有频率特征,得到了不同物理阶段下的自振分量

理论计算模型及特征方程,进一步明确了不同物理阶段的主要固有频率的差异,表明固有频率可作为有效的故障信息。对于两相故障、两相接地故障及单相接地故障亦可以采用同样方法进行分析,此处不再赘述。

### 3 仿真验证

本文以图6所示750 kV双端带并联电抗器的输电线路系统为例,对线路发生电弧性故障时进行PSCAD仿真并结合MATLAB进行计算分析。

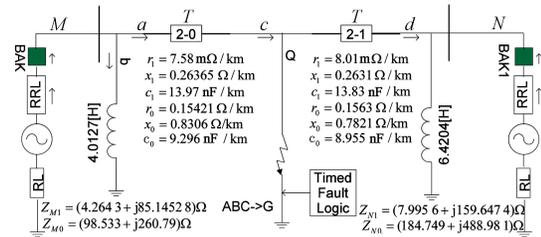
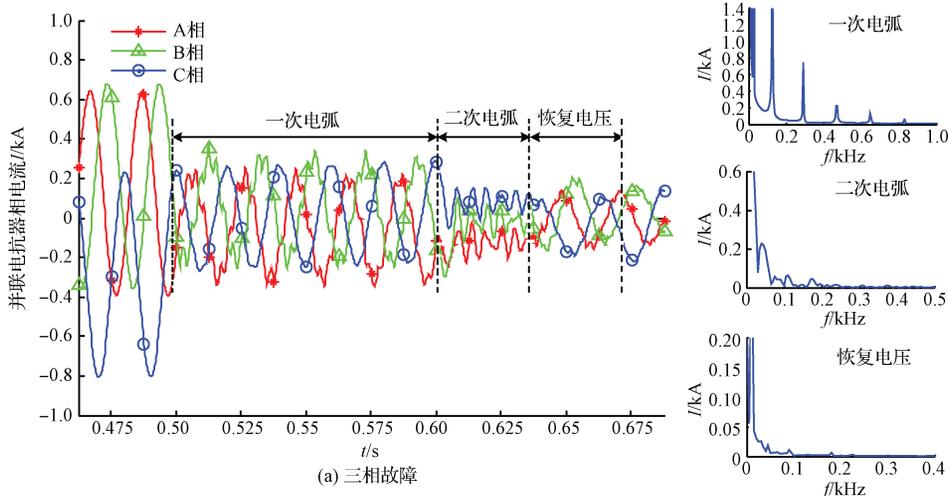


图6 750 kV输电线路系统

假定输电线路在0.5 s时发生故障,0.6 s时线路两侧断路器跳开,0.637 s时故障消失,过渡电阻取  $R_g = 0.1 \Omega$ 。在线路发生三相故障、两相相间故障、两相接地故障和单相接地故障时的仿真波形,以及一次电弧、二次电弧及恢复电压阶段的傅里叶变换频谱分布如图7所示。

从图7(a)~(d)关于不同故障类型下的并联电抗器电流及其频谱可知:1)输电线路在0.5 s发生三相故障时并抗器电流波形如图7(a)所示,故障后的波形除了基波分量还含有大量固有频率分量。对一次电弧、二次电弧及恢复电压的A相测量电流数据进行FFT变换得到相应的频谱,亦可看出电流除了基频分量还具有固有频率分量,同时各阶段的固有频率分量有明显区别;2)输电线路发生两相接地故障或两相相间故障时,假设故障相为B相和C相,对一次电弧、二次电弧及恢复电压的复合电流数据进行FFT变换,测量电流及其频谱如图7(b)~图7(c)所示,各阶段的固有频率与三相短路时各阶段固有频率相



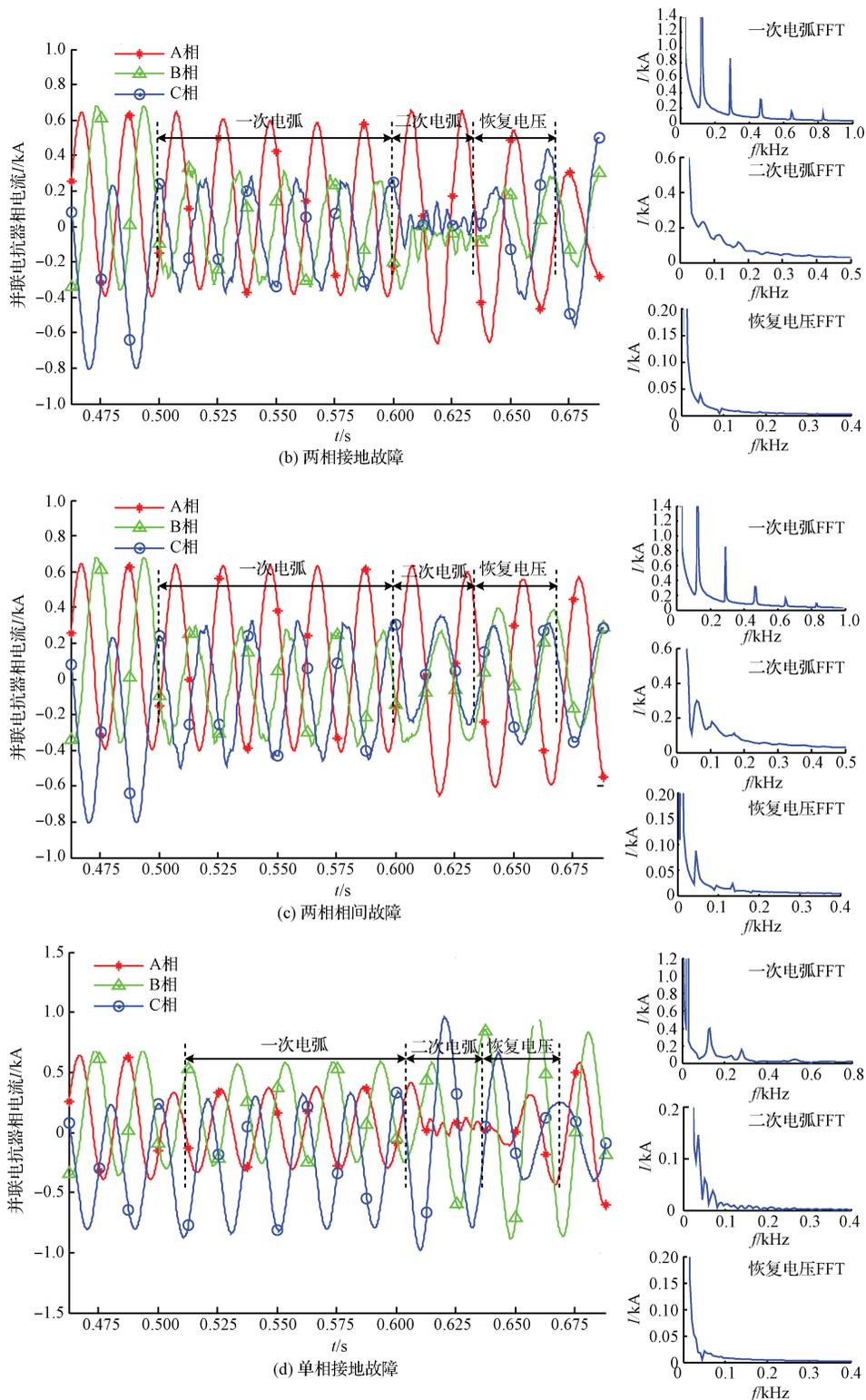


图7 不同故障类型短路测量电流及其频谱

同;3)输电线路发生单相接地故障,假设故障相为A相,对一次电弧、二次电弧及恢复电压阶段的A相测量电流数据进行FFT变换得到相应的频谱,如图7(d)所示。能够根据固有频率特征明显的区别各个阶段。

#### 4 结论

本文针对带并联电抗器的输电线路深入分析了固有频率产生机理,研究了线路发生电弧性故障时3个物理阶

段不同等值网络下固有频率的特性,利用相模变换矩阵对三相耦合线路进行解耦。通过分析明确了三相短路、两相接地短路、两相相间短路以及单相接地短路的一次电弧、二次电弧以及恢复电压阶段有各自固有的频率特征,为下一步研究并构建基于固有频率的线路保护新原理提供了理论上的支持。最后利用 PSCAD 软件建模进行大量的仿真实验,结果表明本文针对带并联电抗器输电线路电弧性故障的固有频率特征相关理论的正确性和适用性。

#### 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]. 第2版. 西安:西安交通大学出版社,2007.
- [2] 刘浩芳,王增平,徐岩,等. 带并联电抗器的超/特高压输电线路单相自适应重合闸故障性质识别判据[J]. 电网技术,2006,30(18):29-34.
- [3] 殷桂梁,孙美玲,肖丽萍. 分布式发电系统孤岛检测方法研究[J]. 电子测量技术,2007,30(1):1-6.
- [4] 索南加乐,孙丹丹,付伟,等. 带并联电抗器输电线路单相自动重合闸永久故障的识别原理研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(11):0-81.
- [5] 邵文权,章霄微,宋江喜,等. 特高压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):20169-20177.
- [6] 李永丽,李博通. 带并联电抗器输电线路三相永久性和瞬时性故障的判别方法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(1):82-90.
- [7] 胡梅,樊敏. 一种模拟电路功能模块故障诊断的方法[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(5):648-654.
- [8] 邵文权,宋国兵,索南加乐,等. 带并联电抗器输电线路三相自适应重合闸永久性故障判别[J]. 中国电机工程学报,2010,30(4):91-98.
- [9] 唐旭英. 双耦合谐振回路选频特性仿真研究[J]. 国外电子测量技术,2015,34(3):42-45.
- [10] 党克,郑玉浩,严干贵. 电网电压不平衡下光伏并网逆变器的同步技术[J]. 仪器仪表学报,2015,36(1):87-94.
- [11] 黄少锋,黄欢,王兴国,等. 特高压输电线路短路故障时的自由振荡频率分析[J]. 高电压技术,2009,35(9):2059-2065.
- [12] 宋国兵,李森,康小宁,等. 一种新相模变换矩阵[J]. 电力系统自动化,2007,31(14):57-60.

#### 作 者 简 介

刘媛,1990年出生,工学硕士,主要研究方向为输电线路自适应重合闸。

E-mail: sophy\_happiness@sina.com

(上接第47页)

- [6] 瞿荣华. 楼宇智能化技术与综合布线的相关研究[J]. 建材与装饰,2015(49):164-165.
- [7] 袁强,何乐生,王威廉. 一种基于AMI系统的无线三相智能电表的设计[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(5):437-478.
- [8] 卫昱含. 基于C-Bus总线的智能家居控制系统[J]. 科技创新导报,2013(12):32-33.
- [9] 史海疆. 施耐德电气的智慧家居[J]. 电气应用,2013,32(2):8-10.

#### 作 者 简 介

师公社,男,高工,硕士生导师,毕业于西安工业大学,主要研究方向为电力电子技术、运动控制系统、建筑给水控制、应急照明、能馈并网等。

E-mail: 843392785@qq.com

李仕元,男,硕士,就读于西安工业大学,主要研究方向为控制理论与控制工程。

E-mail: 350080329@qq.com