

# 220 kV 电力电缆操作过电压及抑制措施

严玉婷<sup>1</sup>, 李靖靖<sup>2</sup>, 甘振宁<sup>1</sup>, 陈铮铮<sup>3</sup>, 赵鹏<sup>3</sup>

(1. 深圳供电局有限公司, 深圳 518001; 2. 深圳新能电力开发设计院有限公司, 深圳 518000;  
3. 中国电力科学研究院有限公司武汉分院, 武汉 430074)

**摘要:** 随着电力系统输电容量不断增大及电压等级的不断升高, 对电缆接头的绝缘配合以及继电保护设计的要求越来越高。为此, 分析了分闸空载线路过电压、正常合闸空载线路过电压和重合闸空载线路过电压等3种常见的操作过电压的特征, 在对比合闸电阻法、避雷器法和并联电抗器法等常见的操作过电压抑制措施的基础上, 分析了相控投切技术的基本原理及其技术优点。最后, 以某220 kV纯电缆线路为例, 仿真分析了该电缆线路在随机合闸、同期合闸以及选相合闸等不同情况下的过电压大小, 仿真结果表明, 通过选相合闸可以有效限制电缆线路的操作过电压水平。

**关键词:** 电力电缆; 选相合闸; 过电压; 抑制; 空载

## 0 引言

近年来, 随着国民经济的快速发展, 用电需求量飞速上涨, 对电力行业发展的需求越来越高。而电力电缆由于其运行故障率低、维护费用低、可靠性高、能适应各种恶劣气象条件等优点得到了极大的发展。但随着我国电力系统输电容量不断增大、电压等级不断升高<sup>[1]</sup>, 对电缆接头的绝缘配合以及继电保护设计的要求也越来越高, 操作过电压一般是指断路器分合闸操作所引起的过电压, 一般持续时间在0.1 s以内<sup>[2]</sup>。随着电压等级的增高, 所允许的操作过电压倍数逐渐减小。近年来在深圳市发生了多起合闸时, 电力电缆接头的爆炸, 因此有必要研究其在高压电力系统中的过电压情况。

刘学忠等人采用永磁操作真空断路器的选相位技术来测量最大操作过电压水平, 得到了操作过电压水平与电缆长度、感性负载和断路器动作相角的密切关系, 模拟试验结果表明真空断路器动作时, 选择合适的相角可在一定程度上限制在电缆系统内产生的操作过电压<sup>[3]</sup>。罗日成等人在分析了电力系统合闸过电压产生机理的基础之上对500 kV输电线路合闸过电压进行分析, 仿真结果表明: 在非同期条件下, 在输电线路末端加装并联电抗器和断路器加装合闸电阻能有效抑制过电压的幅值以及缩短过电压的持续时间<sup>[4]</sup>。余宏桥等人仿真研究了不同电缆长度、不同微电源类型以及不同运行方式下的过电压水平, 仿真结果表明电缆的操作过电压水平与电缆参数、电源类型以及运行方式之间存在一定的关系<sup>[5]</sup>。

本文在分析操作过电压的产生机理以及抑制措施的基础之上, 利用ATP/EMTP电力系统电磁暂态分析软件对深圳某220 kV纯电缆线路进行建模仿真, 研究在非同期情况下不同合闸相角对空载合闸过电压的影响, 并对仿真结果进行了分析。

## 1 仿真模型建立

### 1.1 系统参数

#### 1.1.1 电源参数

本电缆线路采用单端供电方式, 其首端电源电压取电网额定电压220 kV, 本文仿真结果均用标么值表示, 选取179.629 kV作为基准电压。

#### 1.1.2 电缆参数

本电缆型号为YJLW03-Z, 线芯材料为铜芯, 其截面积为2500 mm<sup>2</sup>, 电缆的截面尺寸见图1, 其主要技术参数如表1所示。本线路全长5.14 km, 电缆总共分为9小段, 电缆护套每3小段实现1次均匀换位。

#### 1.1.3 避雷器参数

线路避雷器的额定电压为204 kV, 护层保护器的额定电压为4 kV。

### 1.2 仿真模型

#### 1.2.1 电源模型

计算分闸空载线路过电压时采用相电压幅值为179.6 kV的三相电压源; 计算正常合闸空载线路过电压时采用3个电压幅值为179.629 kV且相位差120°的单相电压源; 计算重合闸空载线路过电压时采用3个电压幅值为179.629 kV且相位差120°的单相电压源和1个用于提供残余电压的三相电压源。

### 1.2.2 电缆模型

电缆模型采用 LCC 元件的 Bergeron 模型。

### 1.2.3 开关模型

计算分闸空载线路过电压时采用三相时控开关, 本文取  $t=0.1$  s 时, 三相开关同时打开。

计算正常合闸空载线路过电压和重合闸空载线路过电压时, 由于过电压水平受断路器合闸时刻的随机性的影响较大, 故采用 Monte Carlo 统计开关模型, 利用统计算法来计算过电压。本文设置 3 个统计开关的合闸时刻在 1 个工频周期内随机均匀分布, 在每种工况下仿真 200 次。

### 1.2.4 避雷器模型

线路避雷器和护层保护器采用非线性电阻元件 MOV。

## 2 计算结果

### 2.1 分闸空载线路过电压

在计算电缆线路分闸空载线路过电压时, 仿真模拟了断路器发生一次电弧重燃的情况, 计算结果表明个接头分闸空载线路过电压标幺值在 1.35~1.85 之间, 其沿线最大过电压出现在电缆线路首端, 且线路首末端的过电压水平明显大于中间接头的过电压水平, 计算结果见表 2, 表 2 中数据均为标幺值。

### 2.2 正常合闸空载线路过电压

在计算电缆线路正常合闸空载线路过电压时, 为得到实际工况中可能出现的最大合闸过电压, 使统计开关在 1 个工频周期内随机合闸 200 次, 计算结果见表 3 (表中数据为标幺值)。仿真结果表明正常合闸空载线路的过电压标幺值水平在 1.70~2.20 之间, 其沿线最大过电压出现在线路末端, 原因是由于电容效应的存在, 过电压水平随着电缆长度的增加而增加。

### 2.3 重合闸空载线路过电压

在计算电缆线路重合闸空载线路过电压时, 为研究残余电荷对过电压水平的影响, 分别仿真计算了 60%、80%、100%残余电压下的重合闸空载线路过电压, 计算结果见表 4。图 2 为在不同残余电压下计算重合闸空载线路过电压的仿真模型。从表 4 中的数据可以看出, 过电压水平随着残余电压的增大而增大, 其沿线最大过电压出现在线路末端。当残余电压为 100%时过电压达到最大, 过电压标幺值水平在 2.00~3.10 之间; 但在电缆实际运行过程中, 一般不采用重合闸的方式。

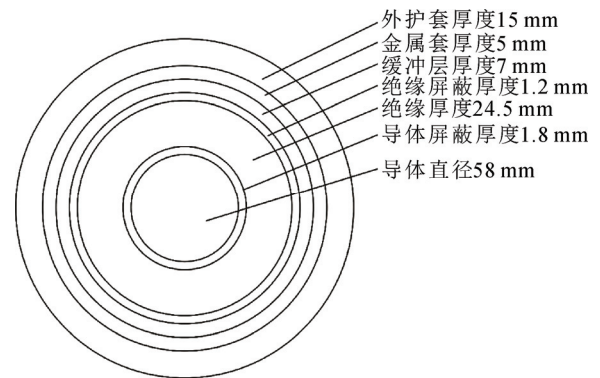


图 1 电缆截面图

表 1 电缆主要技术参数表

参数	数值
额定电压/kV	220
额定载流量/A	1 260
电缆芯数	单芯
线芯材料	铜芯
线芯截面积/mm <sup>2</sup>	2 500
20 °C 时导体最大直流电阻/( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )	0.007 3
正常运行时导体额定温度/°C	90
短路情况导体最高温度/°C	250
电缆净重/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ )	37.427

表 2 分闸空载线路沿线过电压

位置	首端	1 号	2 号	3 号	4 号
过电压幅值	1.85	1.55	1.50	1.35	1.50
位置	5 号	6 号	7 号	8 号	末端
过电压幅值	1.40	1.40	1.45	1.60	1.80

表 3 正常合闸空载线路过电压

位置	首端	1 号	2 号	3 号	4 号
过电压幅值	1.00	1.70	1.90	2.00	2.00
位置	5 号	6 号	7 号	8 号	末端
过电压幅值	2.05	2.10	2.10	2.15	2.20

## 3 过电压抑制措施

选相投切技术提出于上世纪七十年代, 经过近几十年的发展, 技术逐渐实用化, 各种相控开关产品陆续得到应用, 包括投切电容器组、投切空载变压器、投切并联电抗器等。传统方法相比, 选相投切技术具有如下优点<sup>[6-9]</sup>:

1) 经济性。使用相控开关可以有效抑制过电压和涌流, 降低系统的绝缘水平, 减少合闸电阻、避雷器的使用, 从而减少了线路的建设和维护成本。

2) 提高电能质量和系统稳定性。断路器在最

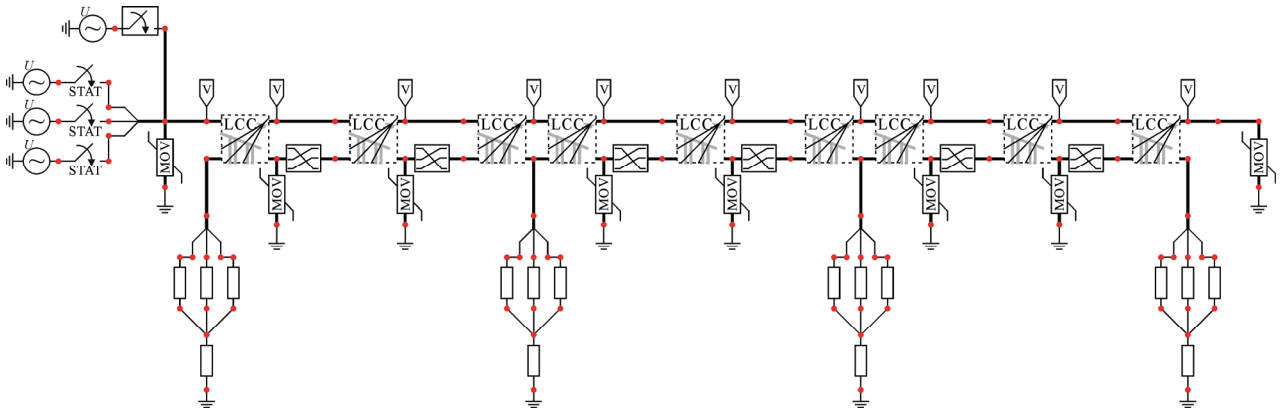


图2 不同残余电压下重合闸空载线路过电压的仿真模型

表4 重合闸空载线路过电压

残余电压	线路过电压标么值					
	首端	1号	3号	5号	7号	末端
60%	1.40	2.05	2.60	2.65	2.80	2.80
80%	1.70	2.15	2.80	2.90	2.90	3.00
100%	2.00	2.25	3.00	3.05	3.05	3.10

表5 电缆线路选相非同期合闸过电压

位置	首端	1号	3号	5号	7号	末端
过电压幅值	1.00	1.01	1.01	1.02	1.03	1.03

佳相位分合闸,可以有效降低谐波的产生,电能质量和系统的稳定性得到提高。

3) 延长设备寿命。相控技术能降低涌流和过电压对线路设备的冲击,在断路器分合闸过程中,在最佳相位动作还能够减少烧蚀现象,从而延长断路器寿命。

当采用选相投切技术时,断路器的 A、B、C 三相可以实现非同期合闸,根据选相合闸策略,各相电压的零点是最佳合闸相角,此时的空载合闸过电压会达到最小。设置断路器 A、B、C 三相的合闸时间分别为 5 ms、11.66 ms 和 8.33 ms,得到电缆线路的合闸过电压见表 5,表中数据为标么值。从仿真结果可以看出,当断路器在各相电压过零点时合闸,电缆线路沿线过电压均大大减小,其线路末端的最大过电压标么值为 1.03。由此可见,采用选相合闸可以很好的限制空载合闸过电压,有利于系统稳定并有效的降低了线路的绝缘水平。

#### 4 结论

1) 分闸空载线路过电压倍数在 1.35~1.85 (标么值) 之间,线路首末端的过电压水平明显大于中直接头的过电压水平。

2) 由于电容效应的存在,正常合闸空载线路的最大过电压出现在线路末端,其最大过电压倍数为 2.20。

3) 重合闸空载线路是最严酷的运行工况,当残余电压为 100%时,其线路末端的过电压倍数可以达到 3.10。

4) 采用选相合闸的模式可以有效的避免线路过电压。

#### 参考文献

- [1] 刘青, 张玉峰, 万耕, 等. 750 kV 交流输电线路的工频及操作过电压[J]. 高压技术, 2009, 35(6): 1-8.
- [2] 张纬钺, 何金良, 高玉明. 过电压防护及绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [3] 刘学忠, 王贤宗, LI Y S, 等. 风电场电缆集电网操作过电压的模拟试验和暂态分析[J]. 高压技术, 2014, 40(1): 61-66.
- [4] 罗日成, 刘从法, 杨冰, 等. 基于 EMTP/ATP 的输电线路合闸过电压仿真分析[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(3): 63-67.
- [5] 余宏桥, 陈水明. 微网中合闸空载电缆时的过电压[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(6): 70-74.
- [6] 李六零, 邱毓昌. 相位控制高压断路器在配电网中的应用[J]. 高压电器, 2002, 42(1): 40-41.
- [7] 丁富华. 真空开关的选相控制及其应用研究[D]. 大连理工大学, 2006.
- [8] 钱家骊. 相位控制高压断路器的动向[J]. 高压电器, 2001, 41(1): 38-40.
- [9] 段雄英, 廖敏夫, 丁富华, 等. 相控开关在电网中的应用及关键技术分析[J]. 高压电器, 2007, 47(2): 113-117.

严玉婷

1982—, 女, 硕士, 高工  
主要从事高压试验方面的工作  
E-mail: athena1570@163.com

李靖靖

1982—, 女, 高工  
主要从事电力行业规划设计工作