

# Simulation and Analysis of Operating Overvoltage of Transmission Line Based on PSCAD 500 KV

Xiaoyu Gong<sup>1</sup>, Jiguang Wu<sup>2</sup>, Bin Cao<sup>2</sup>, Guojiang Liang<sup>1</sup>, Lei Pan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Inner Mongolia University of Technology, Hohhot Inner Mongolia

<sup>2</sup>Inner Mongolia Electric Power Science Research Institute, Hohhot Inner Mongolia

Email: 646707718@qq.com

Received: Aug. 3<sup>rd</sup>, 2016; accepted: Aug. 27<sup>th</sup>, 2016; published: Aug. 30<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Operating overvoltage plays a decisive role in the insulation selection of certain equipment. In order to better carry out the insulation coordination of electrical equipment, to guide the production operation and scientific experiment, it must be calculated in advance. In this paper, taking the Hohhot Pumped Storage Power Station-Wuchuan 500 kV substation transmission line as example, their overhead line operating over voltage and single-phase reclosing overvoltage are simulated calculated by software PSCAD, and the influence factors of three-phase switching over the same period, different period, closing phase, the length of transmission line, lightning arrester and the closing resistance are analyzed innovatively. The research results provide a theoretical basis for the selection of electrical equipment insulation level, closing resistance value and closing phase, and provide limiting measures to suppress the operation over voltage, and are of guiding significance for system operation safety reliability and engineering test.

## Keywords

Operating Overvoltage, Influencing Factors, PSCAD Simulation

---

# 基于PSCAD 500 KV输电线路操作过电压仿真计算分析

宫小宇<sup>1</sup>, 吴集光<sup>2</sup>, 曹 斌<sup>2</sup>, 梁郭江<sup>1</sup>, 潘 磊<sup>1</sup>

<sup>1</sup>内蒙古工业大学, 内蒙古 呼和浩特

<sup>2</sup>内蒙古电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特

Email: 646707718@qq.com

收稿日期: 2016年8月3日; 录用日期: 2016年8月27日; 发布日期: 2016年8月30日

## 摘要

操作过电压对某些设备的绝缘选择起着决定性作用, 为了更好地进行电气设备的绝缘配合, 指导生产运行和科学试验, 事先就必须进行过电压的计算。本文以呼和浩特抽水蓄能电站-武川变电站500 KV输电线路为例, 利用PSCAD软件对其进行合空线操作过电压和单相重合闸过电压仿真计算, 创新性的定量分析了三相合闸同期性、不同期性、合闸相位、线路长度、避雷器和合闸电阻等影响过电压因素。为电气设备的绝缘水平、合闸电阻值和合闸相位的选取提供理论依据, 为抑制操作过电压提供了的限制措施。对系统运行安全可靠性和工程试验具有指导意义。

## 关键词

操作过电压, 影响因素, PSCAD仿真

## 1. 引言

操作过电压是造成电网内高电压设备损坏的重要原因之一, 它伴随着电网的正常操作过程、故障过程而生[1] [2]。过电压的水平不仅与具体的电网环境有关, 而且与投切对象及装设的相关设备有关。特别对于 500 KV 输变电工程, 必须进行过电压的计算, 了解过电压情况, 以便采取防护措施, 指导生产运行和科学试验, 防止过电压损坏设备[3] [4]。目前现有文献[5]-[7]大多采用 EMTP 仿真计算。本文利用 PSCAD 软件以呼和浩特抽水蓄能电站接入武川变电站输变电工程为例, 结合 BPA 程序进行电网等值, 对合空线操作过电压、单相重合闸过电压进行仿真计算。在统计过电压值时创新性的分析了采用单相序最大值统计与取三相序绝对值的最大值统计差异, 表明三相合空线三相序相关性强, 宜用三相绝对值的最大值统计, 单相重合闸三相序相关性弱, 宜用单相序绝对值的最大值统计。在影响合空线操作过电压因素中创新性的量化研究了不同合闸相位对三相同期合闸过电压的影响, 同时也定性的分析了三相合闸同期性、不同期性、线路长度、避雷器和合闸电阻等其它影响因素, 对电网系统绝缘水平、过电压值的统计、合闸初相角和合闸电阻值的选定提供了理论依据, 对 500 KV 输电线路运行安全可靠性和工程的系统试验具有指导意义。

## 2. 仿真模型的建立

### 2.1. 工程简介

呼和浩特抽输变电工程新建 500 kV 抽水蓄能电站, 抽水蓄能电站总装机容量为 1200 MW ( $4 \times 300$  MW), 2 台作为发电机使用, 2 台作为电动机使用; 工程投产后, 在电网中承担调峰、填谷、调频、调相以及事故备用任务。本论文仅研究抽水蓄能电站作为发电机时的情况。抽水蓄能电站经两台主变通过单回 500 kV 输电线路接入武川变电站, 以下简称武蓄线。线路长 21.72 km, 500 KV 线路导线型号  $4 \times \text{JLR1/F2A-360/40}$ , 变压器容量为 360 MVA, 变比为 550/18, 断路器无合闸电阻, 金属氧化物避雷器额定电压线路侧为 444 KV, 母线侧为 420 KV。为了满足工程系统调试的需要, 现对呼和浩特抽水蓄能电

站 500 kV 输变电工程进行操作过电压的计算分析, 以便为工程实施提供理论依据, 为运行提供参考。基于 PSCAD500kV 抽水蓄能电站接入武川变电站网架结构示意图见图 1。

## 2.2. 发电机及其控制系统模型

此工程发电机为凸级机, 发电机上部接口为励磁系统模型, 下部接口为水轮机和水轮机调速模型。此励磁机励磁方式为自并励静止励磁, 水轮机调速器为机械-液压控制。发电机容量 334 MVA, 出口电压为 18 KV, 电流 10.71 KA。发电机模型如图 2 所示。

## 2.3. 500 KV 输电线路参数模型

500 KV 武蓄输电线路相关参数见表 1。

## 2.4. 断路器参数模型

断路器额定电压 550 kV, 额定电流 4 kA。断路器的开断由时序逻辑控制。图 3 页面显示了断路器合闸电阻 400  $\Omega$  以及合闸电阻接入时间 8 ms, 可由断路器主页面自行设置。

## 2.5. 避雷器参数模型

避雷器分别加装在母线侧与线路侧, 所加避雷器伏安特性曲线如图 4 所示, 电流在 1 mA 到 3 kA 范围内, 电压涨幅很小。

## 3. 操作过电压计算

### 3.1. 操作过电压计算基准值

500 KV 操作过电压的基准值均为  $1.0 \text{ pu} = 550 \sqrt{2} / \sqrt{3} = 449.05$ , 以下计算结果都为标么值, 所测电压均为相对地电压, 观测点为线路末端。

### 3.2. 操作方法: 统计过电压计算的蒙特卡洛模型

蒙特卡洛法, 又称统计模拟法或统计试验法, 该方法的基本思想是在需要得到某随机事件的概率时, 可通过某种随机抽样的试验来实现。当试验次数足够多时, 就可把试验得到的统计结果作为问题的近似解答[8]。

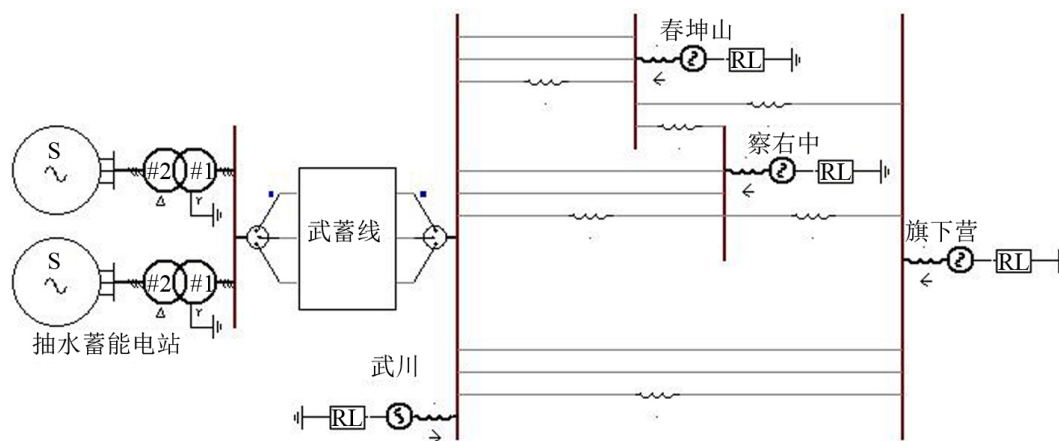


Figure 1. Schematic diagram of power plant substation access Wuchuan grid structure 500 kV pumped storage  
图 1. 500 kV 抽水蓄能电站接入武川变电站网架结构示意图

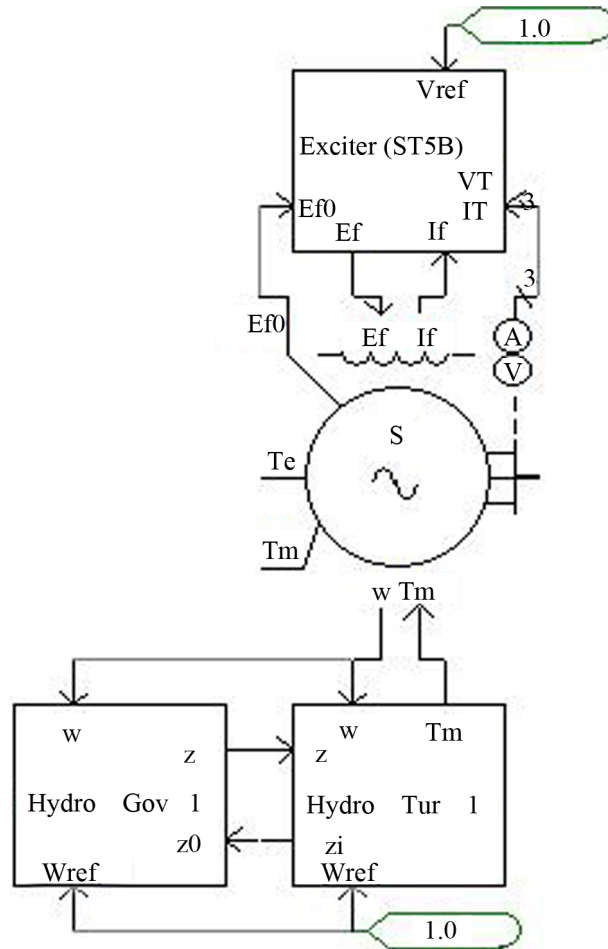


Figure 2. Generator model  
图 2. 发电机模型

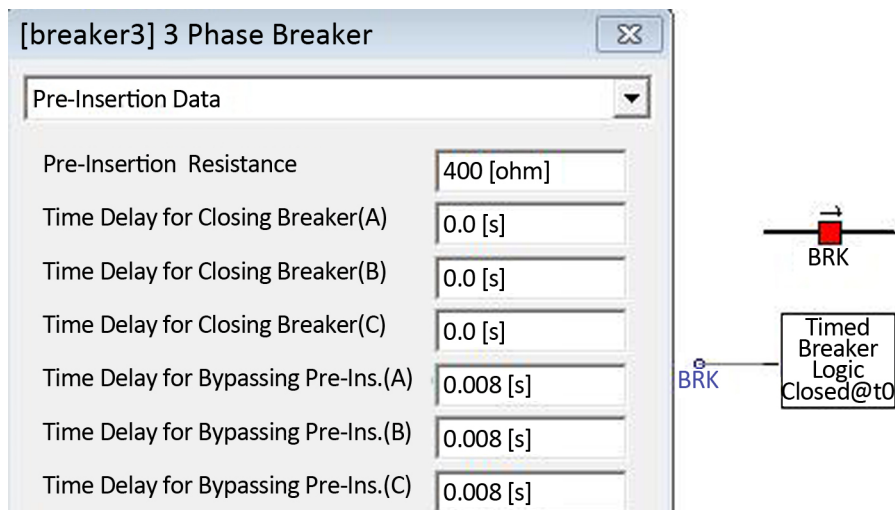


Figure 3. Timing control of circuit breaker  
图 3. 断路器时序控制

针对抽水蓄能电站到武川这条线路进行合空线操作时，由于实际工程中三相合闸具有不同期性合闸

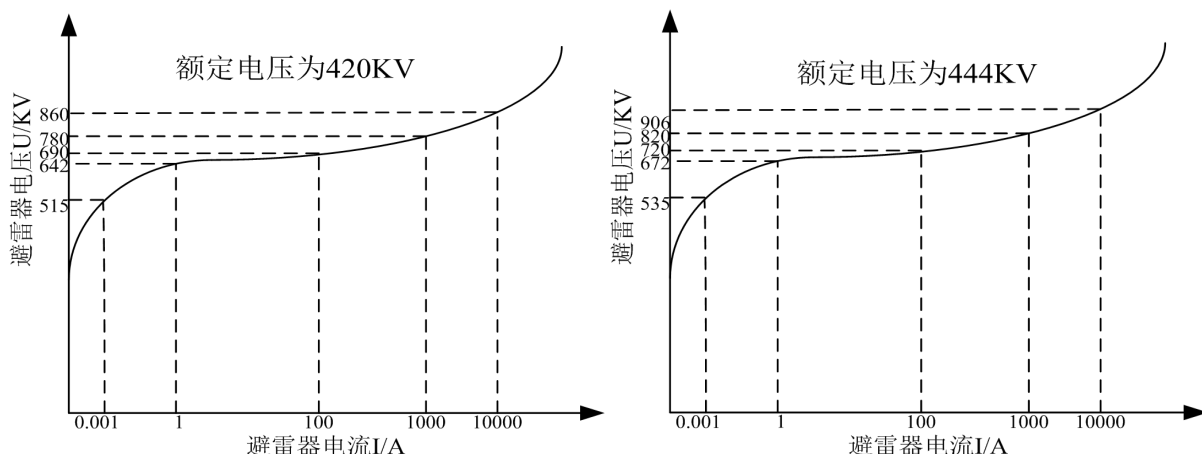


Figure 4. Arrester volt-ampere characteristic curve

图 4. 避雷器伏安特性曲线

Table 1. Parameters of transmission and transformation project of 500 KV pumped storage power station

表 1. 500 KV 抽水蓄能电站输变工程武蓄线路参数

线路长度/km	$R_l/(\Omega \cdot km^{-1})$	$X_l/(\Omega \cdot km^{-1})$	$C_l/(\mu F \cdot km^{-1})$	$R_0/(\Omega \cdot km^{-1})$	$X_0/(\Omega \cdot km^{-1})$	$C_0/(\mu F \cdot km^{-1})$
21.72	0.02012	0.27562	0.01290	0.30870	0.95890	0.00840

相位具有随机性，因此操作过电压具有一定的统计性。断路器的三相触头非同期合闸的概率模型，可用三相触头合闸的平均时间  $t_0$  及各相触头的实际合闸时间  $t_j$  对  $t_0$  的偏离  $\Delta t_j$  来表示： $t_j = t_0 + \Delta t_j, j = a, b, c$ ，式中  $t_0$  由断路器的性能参数决定， $\Delta t_j$  在  $\pm \Delta t_m$  范围内按一定的概率分布规律随机变化， $\Delta t_m$  由断路器的最大合闸不同期时间决定。 $\Delta t_j$  在区间  $(-\Delta t_m, \Delta t_m)$  内服从正态分布。为了考虑初始合闸相位的随机性，引入参数  $t_D$ ，表征初始合闸相位，其取值在一个工频周期 20 ms 内，是一均匀分布的随机变量。考虑三相触头合闸的不同期性及初始合闸相位等随机因素，可用  $[t_D, \Delta t_a, \Delta t_b, \Delta t_c]$  4 个随机变量构成断路器合闸过电压的概率模型[9]-[11]。

用蒙特卡洛法统计计算合闸过电压的步骤为：

- 1) 对  $[t_D, \Delta t_a, \Delta t_b, \Delta t_c]$  4 个随机变量在给定的范围内按其分布规律进行随机抽样，每次抽样由 4 个值组成一组合闸时间的抽样序列。
- 2) 对该次抽样序列模拟计算或试验。取三相电压幅值最大值作为该次抽样试验的合闸过电压值。
- 3) 重复以上步骤  $n$  次 ( $n \geq 120$ )，得到  $n$  次抽样计算结果。
- 4) 对  $n$  次抽样试验结果，按如下公式计算得到样本均值  $u_{mean}$ 、样本标准差  $S$ 、最大过电压值  $U_{max}$ 、最小过电压值  $U_{min}$ ：

$$u_{mean} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \tag{1}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_i - u_{mean})^2}$$

$$u_{max} = \max(u_i), i = 1, \dots, n$$

$$u_{min} = \min(u_i), i = 1, \dots, n$$

- 5) 由样本均值和标准差推断 2% 过电压值。已有研究表明合空载线路过电压近似服从正态分布  $N(u_{mean}, S^2)$ ，故可推断 2% 统计过电压值： $U_{2\%} = U_{mean} + 2.05S$ 。

利用 PSCAD 软件中 Multiple Run 组件模拟真实情况下超高压交流系统中断路器开合闸的三相不同期性和单相重合闸, 形成记录有我们关心的各种输出数据的文件, 包括过电压最大值、最小值、平均值、标准差以及  $U_{2\%}$  统计过电压值。操作模型如图 5 所示。

## 4. 仿真结果及分析

### 4.1. 空载线路合闸操作过电压

#### 4.1.1. 三相同期合闸空载线路

目前多数文献都未详细介绍三相同期合闸过电压, 只是泛泛的概述同期合闸过电压比三相不同期合闸过电压低, 实际工程中由于断路器的机械特性, 断路器三相同期合闸几乎不存在。为了更深刻认识同期与不同期的差异, 同时也为了研究合闸时初相角对合空线操作过电压的影响, 本文仿真了三相断路器在一个工频周期内各个相位同期合闸过电压。断路器无合闸电阻, 线路与母线侧都未加装避雷器, 从武川侧合闸空充武蓄线路, 电压观测点在线路末端抽蓄侧。利用 PSCAD 软件中 Multiple Run 组件, 使断路器在一个工频周期内服从均匀分布, 运行 360 次, 即让合闸初相角在  $[0, 360]$  每个不同的角度合闸一次, 由于同期合闸过电压不符合蒙特卡洛法, 所以不能利用 2% 统计值, 但我们可以利用记录的数据绘制出一个周期的波形表征。在一个周期内三相同期合闸三相序电压分布情况一样。因此我们取其中的 A 相进行统计研究。

由表 2 和图 6 得知合闸初相角对操作过电压的影响非常大, 在  $0^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $360^\circ$  附近合闸时, 线路末端的电压最大为 1.590 p.u, 在  $90^\circ$ 、 $270^\circ$  附近合闸时线路末端电压最小为 0.944 p.u。符合余弦电源电压在  $0^\circ$  时最大, 在  $90^\circ$  时最小的特征。因此在进行合空线操作过电压时, 合理的选择电源初相角可以有效的抑制过电压的大小。

#### 4.1.2. 三相不同期合闸空载线路

在实际的断路器操作中, 三相断路器 A、B、C 合闸时会存在一定的时间差, 尽管时间很短, 但由于先合闸断路器会使后合闸断路器感应电压, 这样就使三相不同期合闸产生的过电压比同期合闸产生的过电压严重很多。断路器无合闸电阻, 线路与母线侧都未加装避雷器, 从武川侧合闸空充武蓄线路[12]。利

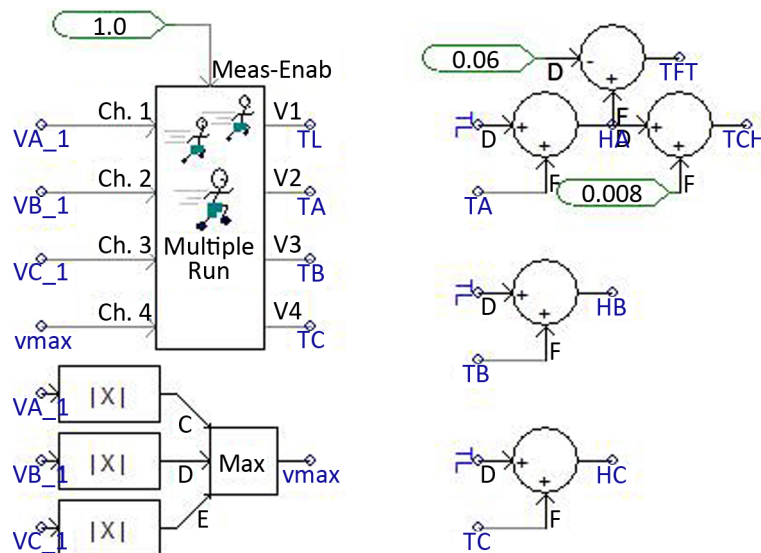


Figure 5. Run Multiple component for the calculation of the statistics overvoltage  
图 5. 统计过电压计算的 Multiple Run 组件

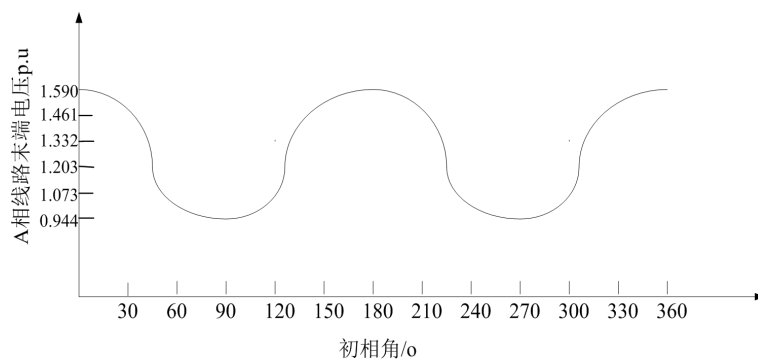


Figure 6. A matched line operating overvoltage distribution with initial phase angle

图 6. A 相空线操作过电压随初相角的分布

Table 2. Effect of closing angle of overhead line operating overvoltage

表 2. 合闸初相角对空线操作过电压的影响

合闸初相角(°)	线路末端电压(p.u)
0	1.590
30	1.321
60	0.953
90	0.944
120	0.975
150	1.412
180	1.590
210	1.321
240	0.953
270	0.944
300	0.975
330	1.412
360	1.321

用 PSCAD 软件中 Multiple Run 组件如图 5 所示,  $T_L$  表示在一个工频周期内服从均匀分布,  $T_A$ 、 $T_B$ 、 $T_C$  表示对  $T_L$  的偏移量, 在  $[-0.0015, 0.0015]$  服从正态分布, 运行 360 次。  $V_A$ 、 $V_B$ 、 $V_C$  分别记录线路末端各自相序电压,  $V_{MAX}$  记录三相序电压绝对值的最大值。

通过对不同期合闸仿真, 利用蒙特卡洛法统计数据显示, 三相电压选最大值绝对值统计  $V_{MAX}$  与单独统计的相序最大值  $V_B$  比较略大些, 由于采取三相电压选最大值绝对值统计时整体数据比较大, 均值也比较高, 导致  $U_{2\%}$  比较高。我们统计时到底选取哪一个作为末端电压比较合理。根据目前多数文献[13]-[15]研究表明空线操作三相数据相关性较强, 不可单独进行统计, 应采用 Case-peak 法, 选取  $V_{MAX}$  作为末端最大操作过电压统计比较合理。同时我们可以观察到, 三相不同期末端过电压值  $V_{MAX}$  相对于同期过电压最大值高很多, 这是由于正常运行时线路处于对称状态, 当断路器三相不同期合闸时, 线路将短时运行在不对称状态。此时, 先合闸相产生的过度电压将通过相间电容耦合到未合闸相的孤立导线上, 使未合闸的相感应出初始电压。

通过图 7 显示三相合闸具有不同周期性, C 相合闸过电压最大约为 1.70 p.u., 与同期合闸最大过电压 1.59

p.u 相比明显高出许多, 进一步证实不同期合闸过电压比同期合闸过电压严重。同时我们可以观察发现合闸过电压持续大概三个工频周期衰减完毕, 这也符合操作过电压幅值高、高频振荡、阻尼强和持续时间较短的特点。

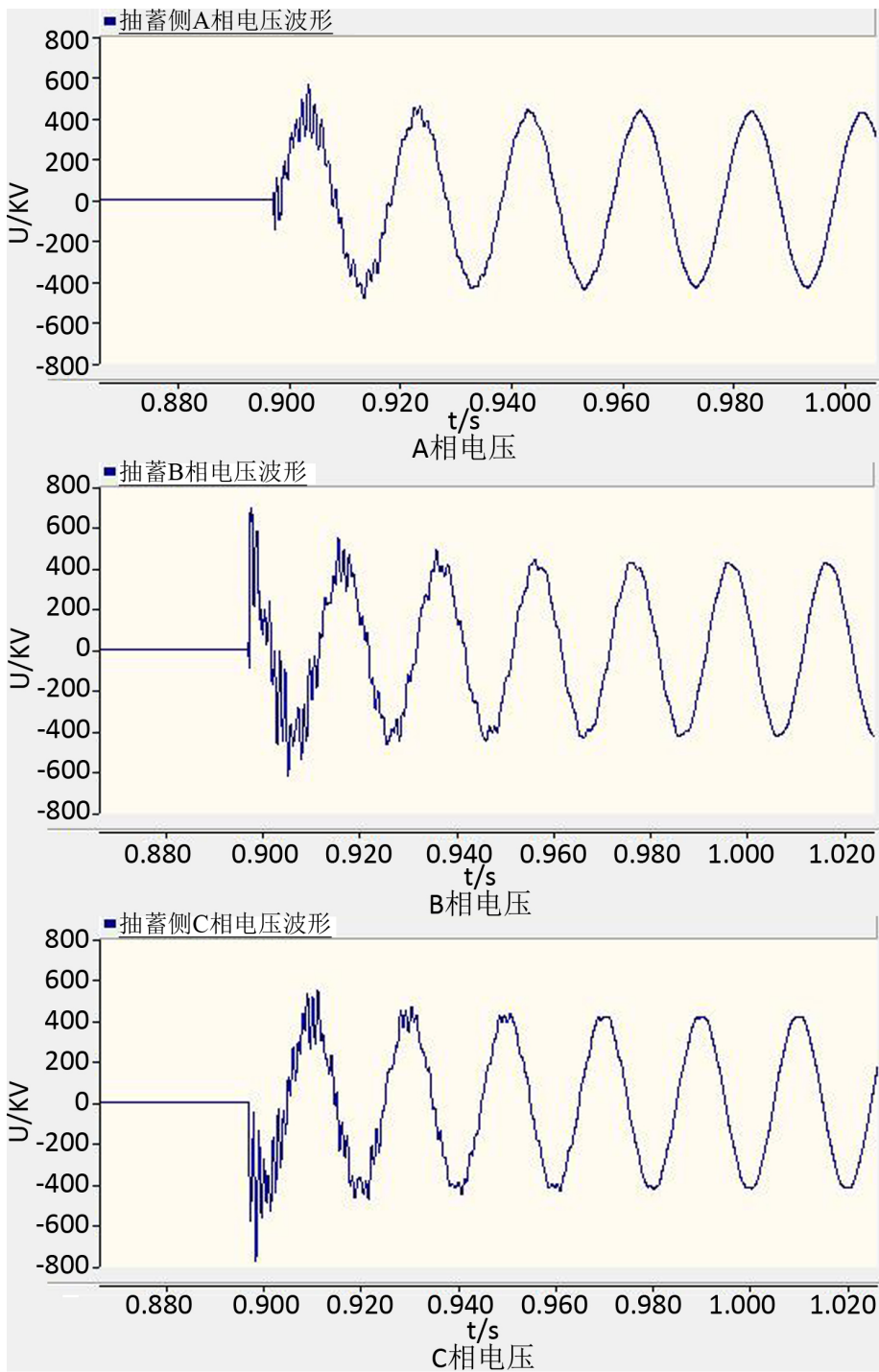


Figure 7. The three-phase voltage terminal waveform under non-synchronous operation of no load line  
图 7. 空载线路不同期合闸操作时三相电压末端波形



### 4.1.3. 三相不同期合闸，线路长度对合闸过电压的影响

在 4.1.2 基础上只改变武蓄空载线路长度，我们定性的研究线路长度对计划合闸过电压的影响，见表 3。

从表仿真数据显示，线路长度越长过电压越高，当线路长度在 100 KM 以内，线路末端  $U_{2\%}$  过电压均未超过 500 KV 电网操作过电压水平允许值 2 p.u [16]。

### 4.1.4. 三相不同期合闸，母线与线路侧加装避雷器

在 4.1.2 基础上加装避雷器于武川母线侧与武蓄线路末端[17]，测量线路末端的电压值。

由表 4 与表 5 数据对比可知加装避雷器能有效的限制合闸过电压水平，表 4 数据为此次工程的真实值。线路末端  $U_{2\%}$  为 1.695 p.u 小于 500 KV 电网规定操作过电压水平 2 p.u。

### 4.1.5. 三相不同期合闸，断路器加装并联合闸电阻

在 4.1.2 基础上断路器加装并联合闸电阻，接入时间为 8 ms [18]。

经表 6 得知，断路器并入合闸电阻后线路末端电压显著降低，合闸电阻值为 400  $\Omega$  时限压效果最明显。因此工程中断路器合闸电阻值一般也为 400  $\Omega$ 。实际操作中由于带有合闸电阻断路器造价非常昂贵，如果避雷器可以限制合空线操作过电压在规程之内，我们一般就不使用合闸电阻，在本工程当中由于线

Table 3. Effect of line length of overhead line operating overvoltage

表 3. 线路长度对合空线操作过电压的影响

线路长度(km)	不同线路长度下末端 $U_{2\%}$ (p.u)
10	1.718
20	1.718
50	1.834
80	1.885
100	1.943
200	2.059
500	2.523

Table 4. Effect of arrester of overhead line operating over voltage

表 4. 避雷器对合空线操作过电压的影响

	$V_A$ (p.u)	$V_B$ (p.u)	$V_C$ (p.u)	$V_{MAX}$ (p.u)
武川侧合空线线路末端 $U_{2\%}$ 值	1.648	1.655	1.604	1.695

Table 5. Three-phase unsynchronization of overhead line operating over voltage

表 5. 三相不同期合空线操作过电压

	$V_A$ (p.u)	$V_B$ (p.u)	$V_C$ (p.u)	$V_{MAX}$ (p.u)
武川侧合空线线路末端 $U_{2\%}$ 值	1.688	1.694	1.632	1.718

Table 6. Effect of closing resistance of lines operating overvoltage

表 6. 合闸电阻对合空线操作过电压的影响

	合闸电阻( $\Omega$ )	$V_A$ (p.u)	$V_B$ (p.u)	$V_C$ (p.u)	$V_{MAX}$ (p.u)
武川侧合空线线路末端 $U_{2\%}$ 值	400	1.245	1.239	1.237	1.260
	600	1.370	1.358	1.347	1.383
	800	1.477	1.462	1.442	1.488

**Table 7. Single phase switching overvoltage**  
**表 7. 单相重合闸操作过电压**

	重合相序	$V_A$ (p.u)	$V_B$ (p.u)	$V_C$ (p.u)
武川侧单相重合线路末端 $U_{2\%}$ 值	A 相	1.743	1.226	1.222
	B 相	1.237	1.760	1.243
	C 相	1.247	1.228	1.730

路比较短，断路器未采用带有并联电阻的断路器，但是对于长距离电压等级更高的线路，就有必要使用带有并联电阻的断路器抑制合空线操作过电压。

#### 4.2. 线路发生单相接地故障后重合闸过电压

根据运行情况表明，在 220 kV 以上的超高压线路故障中，90% 以上为单相接地故障。在单相接地故障时仅跳开故障相，而未发生故障的两相仍然继续运行，采用单相自动重合闸方式。实行单相自动重合闸有利于提高系统的动态稳定；在单侧电源供电的线路上采用单相自动重合闸可以不间断对用户供电。因此在这些线路上单相自动重合闸获得广泛的应用[19] [20]。

武蓄线路中的任一相发生单相接地故障后，故障相线路两侧断路器断开，待故障切除后，武川侧断路器重合，断路器无合闸电阻，线路与母线侧加装避雷器，操作方式如图 5 所示。利用 Multiple Run 组件运行 360 次，记录下线路测末端各相序的电压  $U_{2\%}$  值。单相重合闸统计相关文献介绍的比较少，我们必须通过计算判断三相相关性强弱来判定使用哪种统计。以 C 相序单相重合闸为例，用记录的数据计算 AB、AC、BC 两相之间的相关系数。 $\rho_{ab} = 0.58$ ， $\rho_{ac} = 0.05$ ， $\rho_{bc} = 0.08$ ，根据文献[21]可知否定域  $\rho$  为 0.179，AC、BC 两相之间的相关系数均小于 0.179。由此我们可以得出故障相与非故障相之间的相关性非常弱，所以采取单相序统计最大值  $U_{2\%}$ 。

通过表 7 可知，单相重合闸过电压与相序相关，B 相发生故障重合闸过电压最严重约为 1.76 p.u，小于 500 KV 电网规定操作过电压水平 2 p.u，符合规程规定。工程中一般取最大值作为标准，即取 B 相作为单相重合闸过电压水平。通过表 4 与表 7 对比显示单相重合闸操作过电压比合空线操作过电压严重，这是由于非故障两相一直运行导致合闸起始电压比空载线路合闸时高，其次就是非故障相通过相间电容感应电压。

### 5. 结论

1) 本文利用 PSCAD 软件搭建呼和浩特抽水蓄能电站接入武川变电站模型，仿真计算了合空线操作过电压与单相重合闸过电压，在采用避雷器情况下，三相合闸过电压最大为 1.695 p.u，单相重合闸过电压最大为 1.76 p.u，均小于 2 p.u。符合安全规程，为电气设备的绝缘水平提供理论依据，对系统运行安全性和工程试验具有指导意义。

2) 在统计过电压值时通过对比单相序最大值统计与三相序绝对值的最大值统计差异，分析表明三相合空线三相序相关性强，宜用三相序绝对值的最大值统计。

3) 通过模型仿真一个工频周期不同合闸初相角的过电压情况，表明合理的选择初相角能有效的抑制操作过电压。单相重合闸三相序相关性弱，宜用单相序统计。

4) 本文对一定长度线路断路器合闸电阻值的选取，避雷器的选择提供了理论依据，为抑制操作过电压提供了限制措施。

## 参考文献 (References)

- [1] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [2] 赵智大. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [3] 康鹏. 贵州电力系统 500 kV 鸭福线工频过电压与操作过电压研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
- [4] 韩彦华, 钱鑫, 施围. 阳城 - 江苏输电工程的过电压研究[J]. 高压电器, 2001, 37(3): 19-60.
- [5] 罗日成, 刘从法, 杨冰. 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): 64-67.
- [6] 顾丹珍, 艾芊, 陈陈, 等. 基于 ATP-EMTP 的大型电力系统暂态稳定仿真[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 54-56.
- [7] 刘青, 张玉峰, 万耕. 750 kV 交流输电线路的工频及操作过电压[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 39-45.
- [8] 吴维韩, 张芳榴. 电力系统过电压数值计算. 北京: 科学出版社, 1989: 19-60.
- [9] 夏成军, 张尧, 邹俊雄. 合空线统计过电压的建模与仿真[J]. 高电压技术, 2007, 33(10): 11-15.
- [10] 张叔禹, 吴集光, 曹斌. 超高压输变电系统内部过电压分析与 PSCAD/EMTDC 仿真应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [11] 栗向鑫, 曹斌, 张鹏. 基于 PSCAD500 kV 武 - 察同塔双回输电工程内过电压仿真分析[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 84-92.
- [12] 侯宗毅, 周雪梅, 冯春华. 非同期合闸过电压模型的概周期解[J]. 桂林电子科技大学学报, 2008, 28(2): 17-21.
- [13] 刘渝根, 刘敏, 苏玉萍. 取消 750 kV 断路器合闸电阻的可行性研究[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 9-11.
- [14] 黄燕艳, 陈梁金, 施围. 750 kV 输电系统操作过电压的统计计算[J]. 高电压技术, 2004, 30(8): 6-8.
- [15] 张玉琼, 顾雪平. 基于随机统计分析的黑启动操作过电压的计算校验[J]. 电工技术学报, 2005, 20(5): 15-17.
- [16] DL/T 620-1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [17] 陈水明, 许伟, 何金良. 沿线多组避雷器深度限制特高压操作过电压[J]. 高压电器, 2006, 32(12): 11-15.
- [18] 计荣荣, 易强, 苏菲. 超特高压交流输电线路断路器合闸电阻的适用性研究[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 18-25.
- [19] 白维祖. 超高压输电线路自适应单相重合闸的判据研究[D]. 西安科技大学, 2008.
- [20] 张建超, 刘晓波. 特高压输电线路单相自动重合闸过电压的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 71-74.
- [21] 王秉钧, 王昌长, 等. 数理统计在过电压技术中的应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.

### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>