

# 黑启动过程中操作过电压分析

刘连志<sup>1</sup>, 赵 灿<sup>2</sup>, 韩振明<sup>3</sup>

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071003; 2. 保定供电公司, 河北 保定 071000;

3. 沧州电力公司, 河北 沧州 061001)

**摘 要:**在制定电力系统黑启动方案过程中,为验证方案的可行性,需要对黑启动方案进行各项技术指标(发电机的自励磁、空充线路过电压、频率和电压稳定问题等)的校验,以便成为黑启动方案的备选方案,其中空载线路合闸操作过电压的校验便是其中较为重要的一项。对电力系统黑启动过程中的操作过电压问题进行了理论分析,并用 MATLAB/SMULNK 软件进行仿真,将计算结果和仿真结果进行了对比,证明了在黑启动恢复过程中对空载线路进行合闸操作存在过电压的可能,最后结合河北南网的实际情况,用河北南网的某一黑启动方案进行验证,证明了理论分析的正确性,同时提出了抑制空载线路过电压的措施。

**关键词:**黑启动;空载线路;过电压;SMULNK 仿真

**Abstract:** During working out the black-start scheme of power system, in order to prove the feasibility of the scheme, the verification of different technical criteria should be carried out for black-start scheme, including generator self-excitation, unloaded line overvoltage, frequency and voltage stability and so on. With the aim of becoming one of the feasible black-start plans, the verification of switching overvoltage in unloaded line is one of the important verification. The theoretical analysis on switching overvoltage during the black-start of power system is carried out. A simulation is carried out with MATLAB/SMULNK software. The simulation results are compared with the calculating results. The results show that the overvoltage theoretical analysis has proved correct, and during black-start this operation will lead to overvoltage probably. Finally, taking the south power system of Hebei province for example, it proves the theoretical analysis correct, and the measures to suppress the overvoltage of unloaded line are proposed.

**Key words:** black-start; unloaded line; overvoltage; SMULNK simulation

**中图分类号:** TM864 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)03-0028-03

近年来,全世界范围内大规模的停电事故时有发生,造成了巨大的经济损失和社会影响。如何在系统大面积停电后快速安全地完成系统的恢复重建,是目前电力系统研究的一个热点。制定系统在大停电后的黑启动方案便是解决这个问题的一种有效方法<sup>[1,2]</sup>。在大停电事故后,调度员可在黑启动方案的指导下,及时、快速、稳定地实现对电力系统的恢复。电力系统的黑启动涉及电力系统运行的许多方面,例如自励磁、合闸过电压、静态稳定与低频振荡、电压与频率稳定性等。在制定黑启动方案的过程中要对启动电源和启动路径进行选择,因此大量空充线路过电压的仿真计算是必不可少的,黑启动是在整个系统全停后进行的自救和恢复,整个过程中电力系统处于十分薄弱的状态,任何微小的偏差和扰动都有可能造成黑启动的失败。因此制定后的黑启动方案需要经过严格的审核和仿真校验方能实施。其中,对空载线路

合闸过电压的校验是黑启动方案校验的重要组成部分。空载线路合闸过电压属于电磁暂态的范畴<sup>[3]</sup>,黑启动初期要通过输电线路对被启动电厂的厂用电母线进行充电,这一运行方式和电网的正常运行方式差别很大有其自身的特殊性,下面对空充线路过电压的原理进行了分析,并用 MATLAB/SMULNK 软件对示例系统进行了仿真计算,并提出了抑制空充线路过电压的措施。

## 1 电力系统黑启动操作过电压分析

电力系统中具有许多的感性和容性元件组成复杂的振荡回路,当进行操作或发生故障时,电力系统从一种稳定工作状态通过振荡转变到另一种稳定工作状态,在此过渡过程中将会产生暂态性质的过电压,称为操作过电压<sup>[3,4]</sup>。黑启动过程中的合闸过电

压属于计划性的合闸操作,合闸操作之前,线路不存在接地故障和残余电压;合闸后,线路各点的电压由零值过渡到由电容效应决定的工频稳态电压。制定电力系统黑启动方案时,首先要确定自启动机组和被启动机组,然后确定从自启动机组到被启动机组之间的供电路径。选择供电路径时必须进行路径的空载充电过电压校验,过电压小于规定的限值才能作为可用的供电路径。

由于黑启动过程中作为自启动机组的发电厂通常是水力发电厂或抽水蓄能电厂,而作为被启动机组的发电厂通常是火力发电厂,地理位置上的距离使得充电路径较长、电压等级较高,从而过电压情况比较严重<sup>[2,6~8]</sup>。这种情况下的过电压通常由两部分组成:工频过电压和操作过电压。由于工频过电压为稳态性质过电压,幅值一般较小,操作过电压占据了主导地位,因此在校验黑启动空充输电线路过电压时主要考虑操作过电压。在没有补偿装置的情况下,线路末端的过电压程度最高,所以通常情况下只要校验线路末端的过电压情况即可。其等值电路如图 1 所示,图中,  $U_1$  为线路首端稳态电压幅值,  $U_2$  为线路末端稳态电压幅值,  $x$  为与线路末端的距离,  $U_x$  为  $x$  处的电压,  $E$  为电源幅值,  $x_s$  为电源漏抗, DL 为断路器。



图 1 空载合闸等值电路图

计算公式如下:这里只考虑计划性三相同期合闸,暂态过程只有正序分量。运算传播系数  $\gamma = \frac{p}{v}$ ,

其中  $p = \frac{d}{dt}$ ,  $v$  为正序波速,忽略电阻损耗,线路长为  $l$   $Z$  为波阻,根据无损传输线方程,运算传播系数可写成:

$$\begin{aligned} A_x &= \text{ch} \frac{px}{v}, & A_l &= \text{ch} \frac{pl}{v}, \\ B_l &= Z \text{sh} \frac{pl}{v}, & C_l &= \frac{1}{Z} \text{sh} \frac{pl}{v} \end{aligned} \quad (1)$$

由于是空载线路,因此电压属于计划性的合闸操作,合闸操作之前,线路

$$u_x(p) = u_e(p) A_x = \frac{e(p) \text{ch} \frac{px}{v}}{\text{ch} \frac{pl}{v} + \frac{pl}{Z} \text{sh} \frac{pl}{v}} \quad (1)$$

式中,  $u_x(p)$  为离末端  $x$  处的电压,  $u_e(p)$  为线路末端运算电压,  $e(p)$  为电源电动势,  $x_s = \omega L_s$  为电源漏抗。

利用分解定理,求出  $u_x(p)$  的原函数:

$$u_x(t) = U_2 \cos \lambda x \cos(\omega_i t + \theta) - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{K_i S_i \cos \theta}{\cos \delta_i} \cos \frac{\omega_i x}{v} \cos(\omega_i t + \delta_i) \quad (2)$$

其中,  $U_2$  为末端稳态电压幅值,即:

$$U_2 = \frac{E}{\cos \lambda - \frac{x_s}{Z} \sin \lambda} \quad (3)$$

式中,  $\lambda$  为导线长度的电角度;  $E$  为电源幅值,  $x_s$  为电源漏抗,  $\lambda_x = \frac{\omega x}{v}$ ;  $\omega_i$  为自振角频率,  $\theta$  为电源相位角。

$K_i$ ,  $S_i$  和  $\delta_i$  为系数,由  $\omega_i$ ,  $\lambda$ ,  $x_s$ ,  $Z$  和  $\theta$  表示。

由上式可见,式(2)右边第一项为过渡过程电压  $u_x(t)$  的工频稳态分量(强制分量),后一项是暂态分量(自由振荡分量),合闸后线路各点的电压由零值过渡到有电容效应决定的工频稳态电压,从而出现振荡过电压。由于实际中长线路的分布参数特性和线路损耗的存在,操作过电压将由工频稳态分量和无限个迅速衰减的谐波分量叠加而成。因此,操作过电压是在工频过电压  $U_2$  的基础上振荡产生的,  $U_2$  越高,操作过电压的幅值越高<sup>[3,5]</sup>。

由于操作过电压的能量来源于系统本身,所以过电压幅值与系统的额定电压大致存在一定的倍数关系。通常以系统的最高运行相电压幅值  $U_{ph,m}$  为基值来计算过电压幅值的倍数  $k$ 。操作过电压与系统结构、设备特性、特别是断路器的特性有关<sup>[9]</sup>。在电力设备绝缘设计中,根据过电压保护规程对操作过电压倍数作如表 1 规定。

表 1 不同电压等级允许最大过电压倍数

电压等级	接地情况	允许最大过电压倍数
30~65 kV	非直接接地	4.0
110~145 kV	非直接接地	3.5
110~220 kV	直接接地	3.0
330 kV	直接接地	2.75
500 kV	直接接地	2 或 2.2

这些数据是参考国内外实测的统计并结合中国的运行经验确定的<sup>[10]</sup>。

## 2 空载操作过电压的仿真计算

### 2.1 仿真软件

在 MATLAB 7.1 的仿真平台 SMULNK 下,应用

其中的电力系统模块库进行模型构建和仿真计算,它提供了由电力工业领域专家提出并经过实际验证的电力系统仿真分析专用的各种线性与非线性元件和模块,可以实现对电力系统的稳态和暂态仿真计算分析。

### 2.2 算例分析一

500 kV 线路为四分裂的输电线路如图 2 所示,其正序电抗、正序电容、零序电抗和零序电容分别为  $0.28 \Omega / \text{km}$ ,  $0.14 \mu\text{F} / \text{km}$ ,  $0.8 \Omega / \text{km}$ ,  $0.009 \mu\text{F} / \text{km}$ , 其正序电阻和零序电阻分别约为  $0.03 \Omega / \text{km}$  和  $0.25 \Omega / \text{km}$ 。在上述仿真模型中,电压源采用的是正弦曲线,所以取三相同期合闸时间为  $t=0.01 \text{ s}$  即 A 相电压达到最大值的情况;三相非同期合闸时间分别为  $t_a=0.01 \text{ s}$   $t_b=0.011 \text{ s}$   $t_c=0.012 \text{ s}$

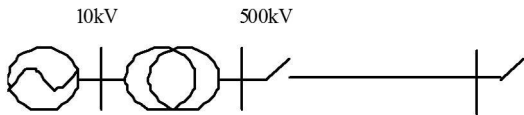


图 2 示例空载合闸等值电路图

在 MATLAB /SMULNK 中根据示例的实际情况建立线路空载充电过电压仿真模型如图 3 所示,并按照相应的参数进行设置。

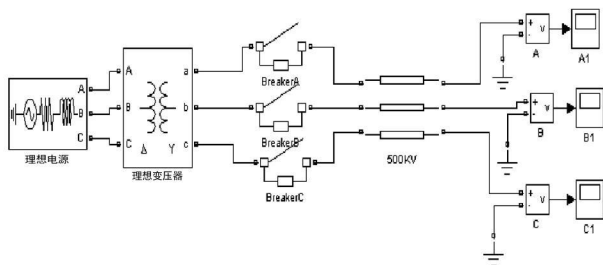


图 3 示例空载合闸仿真图

仿真结果如图 4 所示。

### 2.3 算例分析二

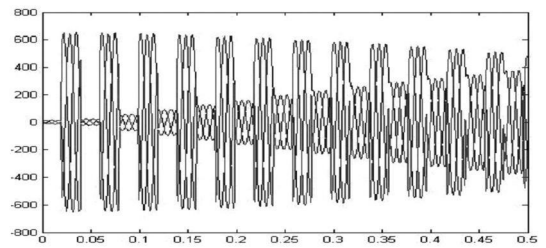
结合河北南网的实际情况,选取正在建设的张河湾抽水蓄能电厂作为黑启动电源,通过 220 kV 输电线路,经许营站、常山站给西柏坡电厂提供启动电源,其等值电路如图 5 所示。

表 2 线路末端空载合闸过电压倍数

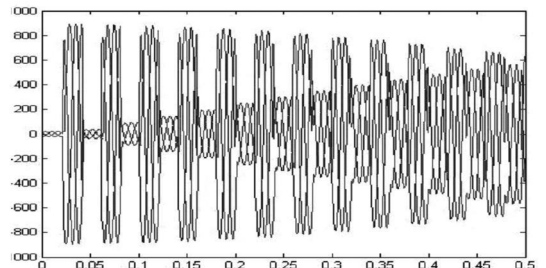
电压等级	同期合闸		非同期合闸	
	最大电压值	过电压倍数	最大电压值	过电压倍数
500 kV	640	1.568	898	2.199

在 MATLAB /SMULNK 中根据河北南网实际情况建立线路空充过电压仿真模型如图 6 所示。

仿真结果:在本例中,由于黑启动过程中的操作为计划性合闸操作,一般采取同期合闸操作,而不考虑不同期合闸操作。SMULNK 仿真 A、B、C 相线路末端的过电压情况如图 7 所示。



(同期合闸操作过电压仿真图)



(非同期合闸操作过电压仿真图)

图 4 示例空载合闸线路末端电压仿真图

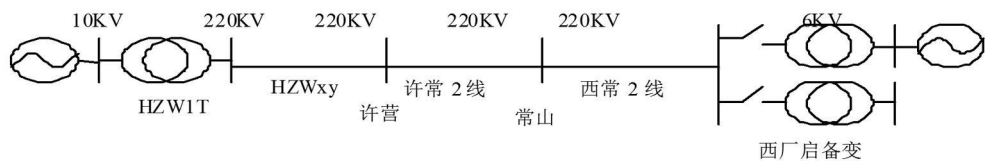


图 5 河北南网黑启动方案等值电路图

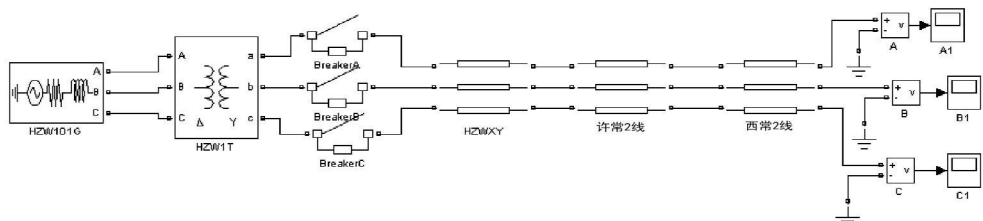


图 6 河北南网黑启动方案仿真图

(下转第 53 页)

- [21] Belén García Juan Carlos Burgos Ángel Matías Alonso Transformer Tank Vibration Modeling as a Method of Detecting Winding Deformations—Part I. Theoretical Foundation. IEEE Trans on Power Delivery, Vol 21, No 1, January 2006.
- [22] 汲胜昌, 王世山, 李清泉, 李彦明, 孙强. 用振动信号分析法监测变压器绕组状况 [J]. 高电压技术, 2002, 28(4): 12-13.

诸兵, 男, (1973—), 硕士研究生. 现为四川电力公司自贡电业局工程师, 主要从事电网运行与调度工作和电气设备故障监测研究。

曾雪梅, 女, (1968—), 大专, 现为四川电力公司自贡电业局技师、助理工程师, 从事电网的运行和调度工作。

黄晓艳, 女, (1979—) 年生, 本科, 现为华电内江发电总厂助理工程师, 从事变电站运行工作。

(收稿日期: 2009-01-05)

作者简介:

(上接第 30 页)

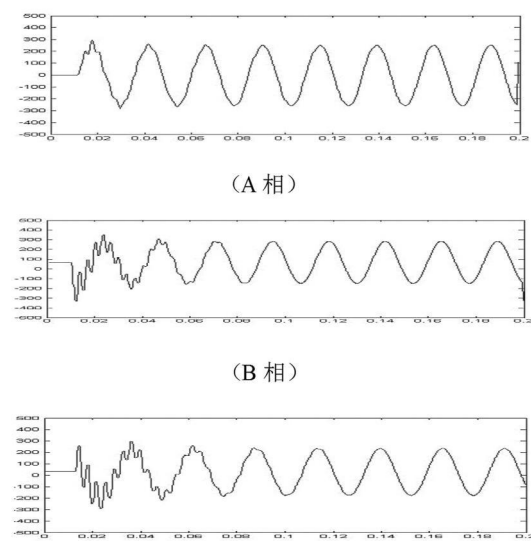


图 7 河北南网黑启动方案线路末端电压仿真图

线路合闸后末端(西柏坡电厂 220 kV 母线)单相过电压波形如图 7 所示。其中 A 相电压最大值 240.3 kV, B 相电压最大值 -351.9 kV, C 相电压最大值 -308.4 kV, 过电压以 B 相为最大, 过电压倍数为 1.959。没有超过最大允许过电压倍数, 满足电力线路运行要求, 此黑启动方案不存在过电压情况。

### 3 结论与措施

仿真计算结果分析表明, 电力系统在黑启动过程中对空载输电线路进行合闸操作时存在过电压的可能。在三相非同期合闸情况下, 线路末端过电压的情况要高于三同期合闸的情况, 结合河北南网的实际情况, 在机组对 220 kV 线路进行空载充电合闸时, 线路末端出现的过电压情况满足运行要求。但是随电压等级的提高、线路的增长, 线路末端出现过电压的概率会增大, 因此要采取有效的措施来抑制过电压情况; 比如, 并联电抗器投入运行, 使电抗器的感性无功

功率可以对线路的容性无功进行部分补偿, 降低过电压值; 双回线路投一回; 或者可以采用断路器的合闸电阻来限制合闸过电压; 还可以通过控制断路器合闸相角的方法, 即使合闸相角在电压过零点附近, 从而降低合闸过电压。

### 参考文献

- [1] 房鑫炎, 郁维镛, 熊慧敏, 等. 电力系统黑启动研究 [J]. 中国电力, 2000, 33(1): 40-43.
- [2] 郭嘉阳, 等. 华北电网“黑启动”实验研究 [J]. 华北电力技术, 2001, (5): 3~17.
- [3] 陈维贤. 电网过电压教程 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [4] 李福寿编著. 电力系统过电压计算 [M]. 北京: 北京水利电力出版社, 1986.
- [5] 解广润, 电力系统过电压 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [6] 顾雪平, 赵书强, 刘艳, 等. 一个实用的电力系统黑启动决策支持系统 [J]. 电网技术, 2004, 28(9): 54-57.
- [7] 张其明, 王万军. 陕西电网黑启动方案研究 [J]. 电网技术, 2002, 26(4): 42-45.
- [8] Gbolaris P, Prousalidis JM, Hatziaegyriou N D, et al. Simulation of long transmission lines energization for black start studies [J]. IEEE Trans on Power Systems 1994, 12(3): 1093-1096.
- [9] 张小易, 顾雪平, 电力系统黑启动过程中过电压问题的研究 [D]. 华北电力大学硕士论文, 2003.
- [10] 张纬钺, 高玉明, 电力系统过电压与绝缘配合 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1988, 112-117.

作者简介:

刘连志 (1982—), 男. 硕士研究生, 主要研究方向电力系统安全防御与恢复控制, 人工智能在电力系统中的应用;

赵灿 (1983—), 男, 助理工程师, 从事方向: 变电站运行与维护管理;

韩振明 (1983—), 男, 助理工程师, 从事方向: 电能计量管理。

(收稿日期: 2009-01-05)