

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180706

单相顺序延时选相合闸方式抑制 500 kV 过补偿线路 直流偏置的仿真研究

张佳鑫¹, 魏颖莉², 郑雄伟¹, 曹树江², 贾伯岩¹, 李海涛³

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021; 2. 国网河北省电力有限公司,
河北 石家庄 050021; 3. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 随着电力系统容量的增加, 线路的缩短, 基于无功补偿而保留并联电抗器的现象越来越多, 如何避免高补偿带来的直流偏置可能造成的系统故障成为一个需要研究的问题。首先基于补偿线路发生直流偏置的机理进行分析, 得到了影响线路直流偏置的影响因素。然后基于 ATP/EMTP 电磁暂态仿真软件建立了仿真模型, 并通过仿真计算与 500 kV 线路试验结果的对比校验了仿真模型的有效性。通过各影响因素的仿真研究, 得到不同影响因素的交叉影响特性。通过对采用相控合闸方式的可行性研究, 提出了采用单相顺序延时选相合闸方式抑制线路直流偏置的优势。

关键词: 直流偏置; 并联电抗器; 高补偿; 选相合闸; 顺序合闸

Research on the depression of DC offset of overcompensated transmission lines by single-phase sequential switching technology

ZHANG Jiaxin¹, WEI Yingli², ZHENG Xiongwei¹, CAO Shujiang², JIA Boyan¹, LI Haitao³

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China; 2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd, Shijiazhuang 050021, China; 3. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: With the increase of power system capacity and the shortening of circuit lines, more and more parallel reactors are retained for reactive power compensation. How to avoid the power system fault caused by DC offset due to high compensation is becoming a problem need to be studied. Firstly, based on the analysis of the mechanism of DC offset in compensating circuit, the influencing factors of DC offset are obtained. And electromagnetic transient simulation model is established based on ATP/EMTP. And the validity of simulation model is made by comparison of the simulation and 500 kV line test results. Cross impact characteristics of the different influence factors is got through the simulation research. And after the feasibility study of the phase selection closing, the advantage of the sequential time-delay phase closing method is put forward for the suppression of DC offset.

This work is supported by Science and Technology Program Self-financing Fund of Hebei Province (No. 17212116) and Science and Technology Program of State Grid Corporation of China.

Key words: DC offset; shunt reactors; high compensation; phase selection closing; sequential time-delay phase closing

0 引言

500 kV 超高压输电线路长度长, 充电功率多, 流进发电机造成系统调压困难。按照分层分区无功

平衡的原则, 一般在长距离超高压线路投运前安装高压并联电抗器^[1]。但随着经济的发展, 电网的容量不断的增加, 新建的超高压变电站又经常采用 π 入破口长线的方式, 使得长线越破越短。原有长线路设计安装的高压并联电抗器可能因为考虑系统的无功不足而保留。因此, 超高压系统中输电线路高补偿、过补偿的现象越来越常见。对于高补偿、过补偿线路合闸时, 由于合闸瞬间电感电流不能突变,

基金项目: 河北省科技计划自筹经费项目 (17212116); 国网河北省电力公司科技项目资助“并联电抗器过补偿线路空充电流直流偏置抑制及智能合闸控制技术研究”

空线电流出现直流偏置现象, 合闸后一段时间(0 到几秒不等)电流没有过零点, 若此时突然三相分闸, 断路器内电弧会由于没有过零点而无法息弧, 长时间灼烧的电弧可能造成断路器损坏^[2]。

国内已对带高抗线路空充电流的直流偏置现象开展了一定的研究, 也取得了一定的研究成果。文献[2-3]概述了交流断路器开断电流时可能产生直流分量的工况, 较早提出了高抗补偿线路合空线时的零偏现象, 建议通过避免线路合分试验进行规避。文献[4]对 130 km 的线路(补偿度约 80%)应用一个周波内采用 ACB 顺序合闸的相控合闸技术进行了试验研究, 试验中合闸相角误差为 25%。文献[5-8]就对影响直流偏置的合闸电阻、补偿度进行了研究, 结果表明补偿度推荐 60%~70%之间, 合闸电阻因较高的故障率, 使得该措施在电力系统的应用受到限制。

近年来, 随着电力电子技术的发展以及新型操动机构的出现, 相控技术在高压和超高压系统中的应用日益广泛, 其在额定负荷下的系统电压、电流下的关合取得了良好的效果^[9-17]。在带并联补偿的线路上采用相控合闸技术, 实质为通过控制线路断路器合闸相角达到避免合闸电流直流偏置的目的。实际应用中的主要难点在于两点: 1) 发生直流偏置的电流为线路单侧合闸的线路容性电流和感性电流和(500 kV 线路 CT 变比一般为 2 500:1, 以 100 km 线路为例, 线路容性电流幅值约为 50 mA), 故对电流互感器抗干扰能力要求高; 2) 对于超高压电压等级断路器, 由于断路器本身机械分散性大, 使得通过精准相控合闸避免直流偏置存在一定的难度。因此, 如何采用一定的控制策略避免单纯采用相控合闸在应用中的局限性成为研究的重点。

总结来看, 之前的研究工作尚存在以下不足:

1) 指出了影响带高抗线路空充电流直流偏置的因素, 也开展了单变量的定性影响研究, 未能指出影响因素的规律性的影响, 也未能综合考虑各影响因素的交叉影响特性。

2) 开展了相关的仿真计算, 但仿真计算模型缺少与实际结果对比的准确性校验。

3) 针对相控技术在实际电力系统中的应用, 提出了一些控制策略, 开展了一些试验研究, 但并未在实际系统中开展多次的应用研究, 且控制策略的应用具有补偿度方面的局限性。

本文首先基于带高抗线路直流偏置的机理进行分析; 其次在建立的仿真模型的基础上开展不同影响因素的交叉影响特性的仿真分析; 通过不同抑制直流偏置措施的优缺点的对比, 提出采用选相合闸

技术和单相顺序合闸策略抑制直流偏置现象的可行性。

1 合空线电流产生直流偏置的机理

带并联电抗器的输电线路 π 型分布参数等值电路如图 1 所示。断路器的电流等于输电线路的对地分布电容的电容电流与高抗感性电流的和。设母线电压为 $u(t) = U_m \cos(\omega t)$, 电压合闸时相角为 φ , 忽略线路等值电路的损耗, 线路对地分布电容为 C , 考虑 $R \ll X_L$, 经代数运算后, $t > 0$ 时合空线电流时域函数可表示为

$$i(t) = U_m \left[\frac{1}{\omega L} - \omega C \right] \sin(\omega t + \varphi) - \frac{U_m}{\omega L \sin \varphi e^{-t/\tau}} \quad (1)$$

由式(1)不难看出, $t > 0$ 时, 断路器电流是由合闸时刻的直流分量和线路对地电容的容性电流分量组成的衰减的电流。因此, 决定断路器电流过零点时间的因素有: (1) 线路和并联高抗的阻性分量; (2) 输电线路的合闸相角; (3) 输电线路的并联高抗和线路总的分布电容大小。

其中, 因 500 kV 输电线路单位长度电容变化不大, 因此线路总对地电容主要由线路长度决定。由式(1)可以看出, 带高抗线路的补偿度会明显影响断路器电流大小, 但两者也并非线性关系。

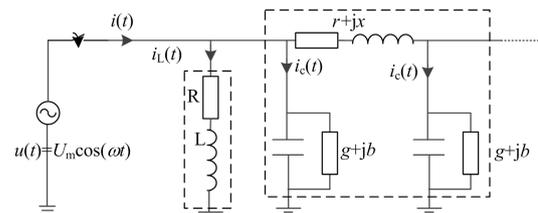


图 1 带并联电抗器的输电线路 π 型等值电路

Fig. 1 π -type equivalent circuit of transmission line with shunt reactor

2 线路空充电流直流偏置的仿真分析

2.1 仿真模型的建立

本文基于 ATP(Alternative Transients Program) 电磁暂态软件^[18-19], 以邢台—武邑一线(简称“台邑一线”)、辛安—官路一线(简称“辛官一线”)及辛集—深州线(简称“集深线”)为例, 对影响直流偏置的因素进行仿真分析, 线路及高抗参数见表 1。相关电网结构见图 2。线路空充电流的计算, 保留河北南网全部 500 kV 线路、变压器、发电机组和全部 220 kV 线路、发变组, 全部 220 kV 变电站视为用电负荷节点, 采用 R-L 模型进行用电负荷等值。在有省际联络线的变电站 500 kV 母线上对外省

500 kV 电网进行多端口或单端口等值简化。线路模型采用计及分布参数特性的序参数模型 LINEZT_3 (Distributed parameters (Clarke) 3 phase. Transposed)。

表 1 线路及高压电抗器参数

Table 1 Parameters of line and shunt reactors

线路名称	长度/km	高压电抗器		中性点小电抗	
		型号(BKD-)	电抗/ Ω	型号(XKD-)	电抗/ Ω
台邑一线	58.152	50000/500	2 043	810/154	759
辛官一线	38.199	50000/500	2 017	945/110	991
集深线	36.386	40000/500	2 521	945/110	991

注：计算中阻值选取为设计值，即高抗电阻取额定值的 0.2%，中性点小电抗的电阻取其电抗值的 3%。

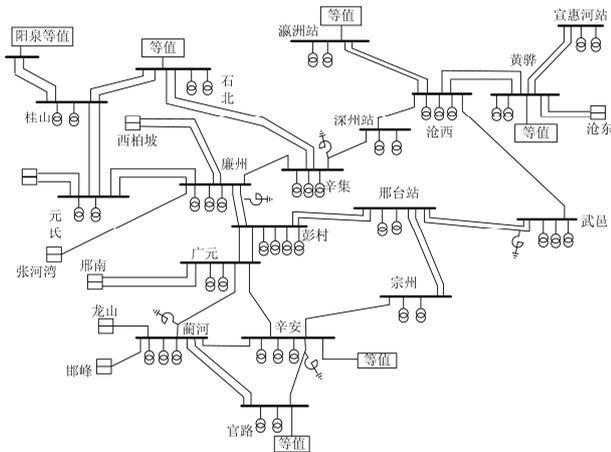


图 2 河北南网部分连线示意图

Fig. 2 Diagram of south-power network in Hebei

2.2 仿真模型的有效性校验

仿真模型的合理性校验通过将仿真计算结果与试验结果的对比实现，均采用单相顺序合闸(依次合入 A、B、C 三相)，对比二者的无过零点时间和波形的变化趋势。试验结果取自 500 kV 台邑一线、辛官一线和集深线三条带高抗线路合空线的空充电流试验结果。

1) 试验流程及相关数据获取方式

投空线试验工作中，可以看到空充电流的零偏现象，但长时间不过零现象很少见，一方面，因为实际合闸试验中恰好碰到合闸角在最严苛的时候较少，另一方面，因为站内故障录波装置采用的 CT 二次线圈在传递电流直流分量的过程中抗饱和和能力差，磁滞效应显现，使其存在着较大的计量误差，文献[19-23]对电流互感器线圈流过直流分量时的传变特性进行了深入的分析。

对比试验中的电流互感器二次线圈采用南瑞

继保公司经抗直流偏磁饱和特性校验的线圈，线路接线示意图如图 3 所示(合闸端为首端)。

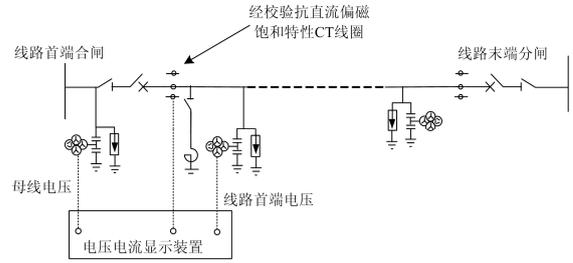


图 3 试验接线示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test wiring

实际合闸时间读取方式为通过合闸后线路首端电压突变时刻与母线电压波形的对比，可得到实际合闸时刻。对于 500 kV 电压等级，一般只有一相母线装有电压互感器，通过可读取相电压推导其他相的实际合闸时刻。

线路空充电流无过零点时间的读取方式为通过读取电流波形有效过零点得到。

2) 仿真结果与试验是结果的对比

试验中合闸时刻归结为偏离电压峰值的时间，仿真中合闸时刻设定为在偏离电压峰值的时间在 5 ms 中间隔 1 ms 取值。仿真结果与试验结果中的空充电流无过零点时间对比如图 4 所示。

由图 4 的波形对比可知：(1) 二者无过零点变化趋势基本相同；(2) 试验结果中的合闸时间基本上集中在 2 ms 内，仿真结果基本上略高于试验结果，因此说明仿真模型的有效性。

2.3 合闸相位、合闸电阻、补偿度对空充电流直流偏置的影响

2.3.1 合闸相位

由于工频电压电流的对称性，选取三条线三相同时在的 A 相电压(电压为余弦函数)合闸角 $0^\circ \sim 90^\circ$ 变化时，对其三相同步合闸时空充电流的无过零时长进行计算，计算结果如图 5 所示。

由图 5 可知，理想的合闸时刻为电压峰值点，无过零点时间随合闸时刻变化也近似呈正线函数，在电压过零点处合闸无过零点最长。

2.3.2 合闸电阻

改变台邑一线线路长度，每个长度下选择三个合闸电阻点进行仿真，计算结果如图 6(a)所示。由图中可以看出，不同线路长度线路带高抗时合空线电流无过零点时间随合闸电阻的变化呈几乎等斜率负线性变化(除去线路长度 110 km 时接近补偿度的峰之点)。将线路长度转化为对应的线路补偿度如图 6(b)所示。

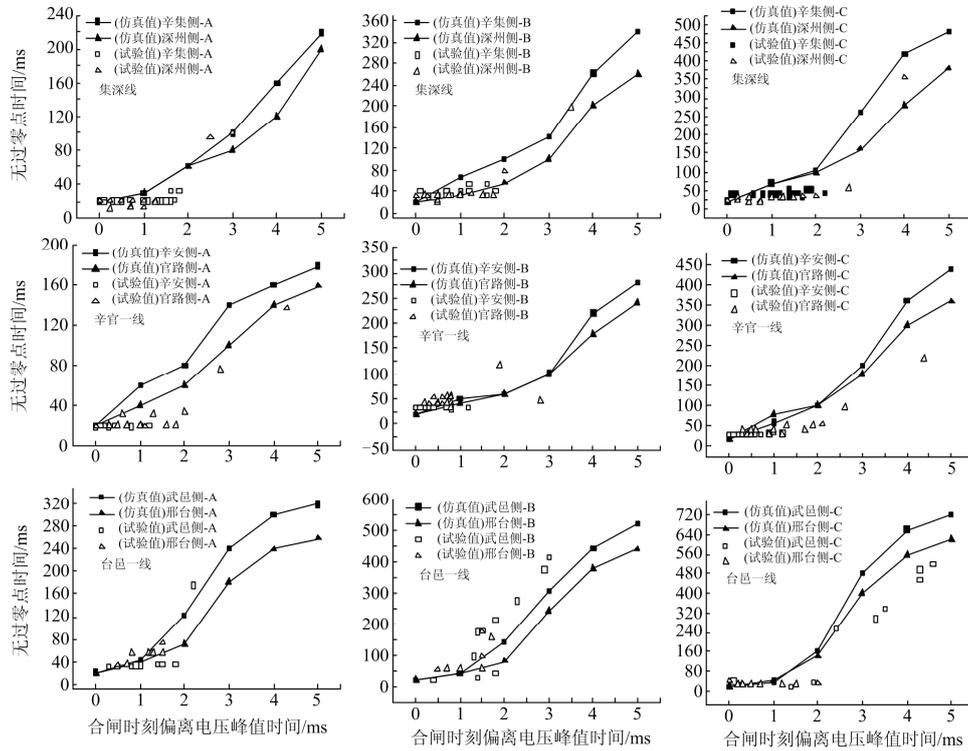


图 4 集深线、辛官一线、台邑一线的仿真和试验结果对比示意图

Fig. 4 Comparison of the simulation and test results for the Ji-shen line, the Xin-guan No.1 line and Tai-yi no.1 line

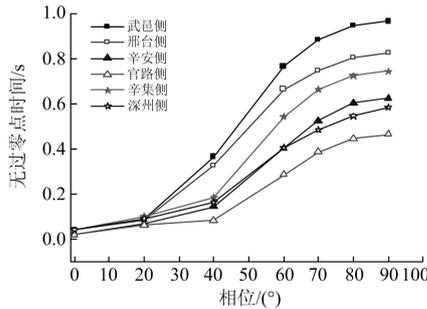
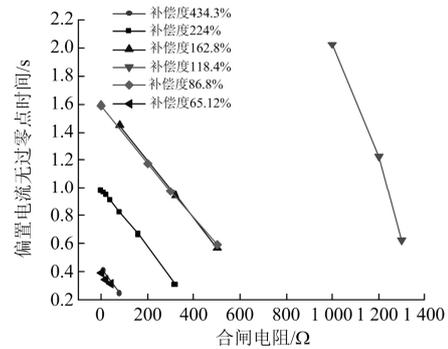


图 5 集深线、辛官一线、台邑一线无过零点时间随合闸相位的变化结果

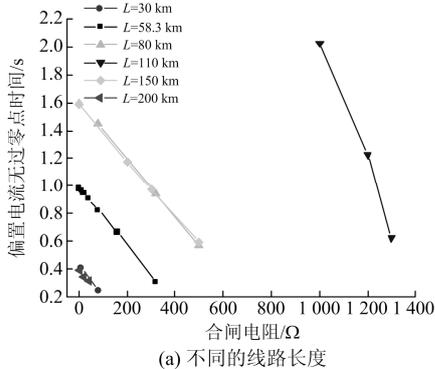
Fig. 5 Result of non-zero crossing time with the phase-closing of the Ji-shen lines, the Xin-guan No.1 lines and Tai-yi No.1 lines



(b) 不同的线路补偿度

图 6 台邑一线武昌侧合空线无过零点时间随合闸电阻的变化曲线

Fig. 6 Curve of the change of non-zero-crossing time with the closing resistor for Wu-yi end of the Tai-yi No.1 line



(a) 不同的线路长度

由图 6 可知: (1) 补偿度 434.3%与 65.12%及 162.8%与 86.8%的偏置电流无过零点时间随合闸电阻的变化曲线基本重合; (2) 理论上可以通过选择不同的合闸电阻解决带高抗线路合空线空充电流的直流偏置问题, 所需合闸电阻的大小与线路的长度(补偿度)有关; (3) 若绘制出不同补偿度下线路合空线偏置电流无过零点时间随合闸电阻变化的一系列曲线图, 将有助于实际生产中为抑制直流偏置问题选用合闸电阻的问题, 而曲线图也可只通过计算 2-3

点合闸电阻下的无过零点时间得到一条曲线。

2.3.3 带高抗线路补偿度

以台邑一线线路参数为线路计算参数改变线路的长度,进而得到不同补偿度下台邑一线武邑侧合空线电流的无过零点时间,如图7所示,计算的补偿度范围为40%~360%。图7中同时作出台邑一线、辛官一线及集深线两端在现有参数下三相合闸在A相90°合闸相角下的无过零点时间的散点图。

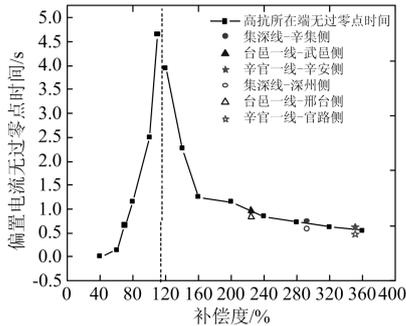


图7 台邑一线武邑侧合空线无过零点时间随补偿度的变化曲线

Fig. 7 Curve of the change of non-zero-crossing time with the compensation degree for Wu-yi end of the Tai-yi No.1 line

由图7的计算结果可以看出,线路合空线电流随线路补偿度的变化曲线类似于驼峰,存在一个峰值,在补偿度为110%时,无过零时间为4.653s,在补偿度为120%时,无过零点时间为3.945s,可以推测看出在补偿度为110%~120%之间存在一个补偿度 x_0 ,在低于该补偿度时,偏置电流无过零点时间与补偿度呈正相关,在高于该补偿度时,偏置电流无过零点时间与补偿度呈负相关。

由带高抗线路合空线空充电流的理论分析可知其时域波形表达式如式(1)所示,理论上当线路高抗补偿度为100%时,合空线电流的交流分量为0,此时将不存在过零点,实际上,理论公式推导中的简化使得交流分量为0点存在一些偏移,这与仿真计算结果相符。

2.3.4 高抗位置端

由图5可以明显的看出,不同线路均是在高抗端的偏置电流无过零点时间大于非高抗端的合空线电流无过零点时间。因此实际合空线中可以选择先合非高抗端再合高抗端的方式减轻带高抗线路合空线的直流偏置问题。

2.4 合闸方式对空充电流直流偏置的影响

由式(1)可以看出,当 $t \rightarrow \infty$ 时, $i(t)$ 可表示为如式(2)所示。

$$i(t) = U_m [1/(\omega L) - \omega C] \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

式中, L 为高抗单相电感(L_1)及中性点小电抗(L_0)的单相对地等值电抗。可统一表示为 $L=L_1+L_0/n$ (当单相合闸时 $n=1$,当两相合闸时 $n=2$,三相合闸时 $n=\infty$)。当线路过补时,不同合闸方式时的稳态电流幅值的关系为:三相合闸>两相合闸>单相合闸;当线路欠补时,不同合闸方式时的稳态电流幅值的关系为:单相合闸>两相合闸>三相合闸。由此不难看出,合闸方式也对线路空载电流直流偏置的时间存在一定影响。

仿真计算线路依次进行A、B、C合闸和三相同时合闸时的空充电流直流偏置的大小如图8所示。

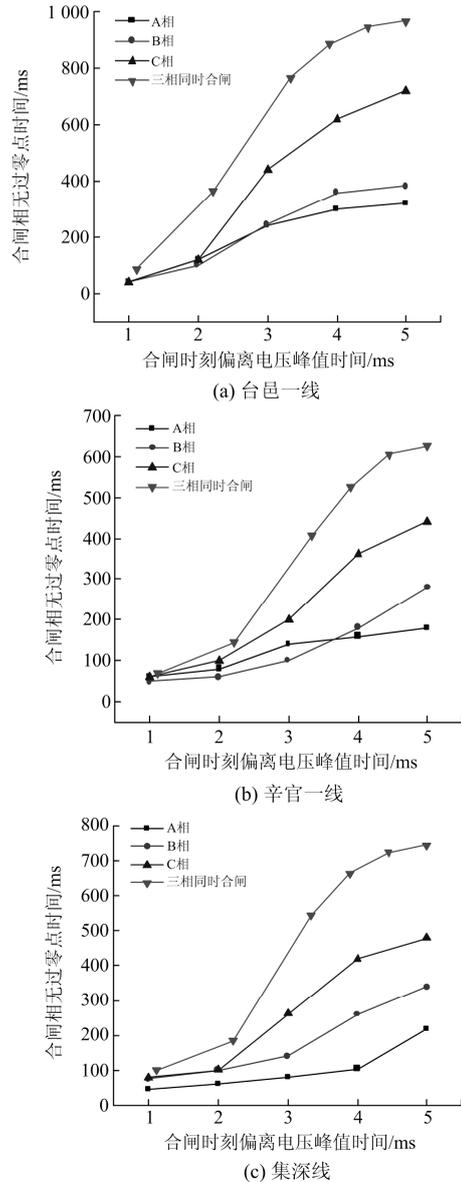


图8 线路三相同步合闸和单相顺序合闸时三相无过零点时间

Fig. 8 Non-zero-crossing time of three-phase at three-phase simultaneous closing and single-phase sequential closing

由图 8 可知, 在任意偏离电压峰值时刻合闸, 三相同步合闸空充电流的无过零点时间均大于单相顺序合闸时间, 单相顺序合闸时, 在此过补偿的三条线路上均是前两相合闸相小于末次合闸相, B 相合闸相电流无过零点时间大于 A 相合闸相电流的无过零点时间。由于系统保护中三相非同期保护跳闸的时间为 2 s, 因此, 尚需充分研究三相的动作配合时间的问题, 使得最后合闸相 C 相在首合闸相 A 相合闸后 2 s 内合闸。

线路单相顺序合闸时 A、B 两相在偏离电压峰值 3 ms、5 ms 时刻合闸后空充电流无过零点时间随补偿度的变化情况见图 9。

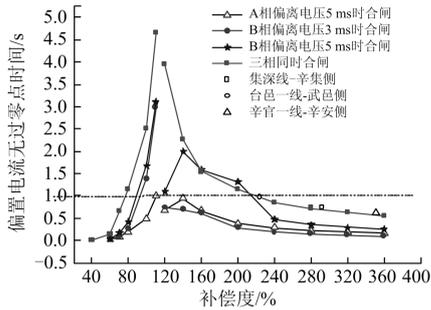


图 9 线路单相顺序合闸时 A、B 相不同合闸时刻的无过零点时间

Fig. 9 Non-zero-crossing time of different closing time of phase A and B at single-phase closing

由图 9 计算结果可知, 采用单相顺序合闸相较于三相同步合闸有明显的优势, 对于第一个合闸相 A 相, 即便在最严苛工况下均在 1 s 内存在过零点, 对于第二个合闸相 B 相, 其在偏离电压峰值 3 ms 内合闸时, 在补偿度小于 90% 或大于 120% 时, 也均在 1 s 内存在过零点。

但是对于单相顺序合闸, 由于可能在长达 1 s 的时间内非全相运行, 需要对中性点小电抗承担的过电压和电流进行校核。

2.5 中性点小电抗过电压和过电流校核

根据 GB/T50064-2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》规定 500 kV 高压并联电抗器经接地电抗器接地时, 中性点小电抗额定短时 (1 min) 工频耐受电压有效值为 140 kV。

若高抗高压侧电压 A、B 两相分别表示为 U_A 、 U_B , 高抗三相电抗值均为 X , 小电抗电抗值表示为 X_0 , 则

A 相单相运行时, 中性点小电抗电压为

$$\dot{U}_{0-1x} = \frac{X_0}{X + X_0} \dot{U}_A \quad (3)$$

A、B 两相运行时

$$\frac{\dot{U}_{0-2x}}{X_0} = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_{0-2x}}{X} + \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{0-2x}}{X} \quad (4)$$

中性点小电抗电压为

$$\dot{U}_{0-2x} = \frac{-X_0}{X + 2X_0} \dot{U}_C \quad (5)$$

显然, 两相运行时中性点电压幅值小于单相运行时的电压。

GB/T50064-2014《交流电气装置的过电压保护与绝缘配合》要求单相运行时中性点工频耐受电压有效值最大为 140 kV, 又系统最高运行电压有效值为 550 kV, 即最高运行相电压有效值为 $550/\sqrt{3}$ kV, 则要求 $X/X_0 > 1.268$, 即 $X_0/X < 0.7886$ 即可满足规程要求。

2.6 小结

本节首先建立了基于河北南部电网的台邑一线、辛官一线、集深线的带高抗线路合空线的空充电流无过零点时间的仿真计算模型, 并通过与试验结果的对比验证了模型的有效性。然后, 通过仿真计算了线路合闸相位、合闸电阻、线路补偿度及高抗所在位置端等因素的对带高抗线路空充电流无过零点时间的交叉影响特性, 最后讨论了单相顺序延时选相合闸方式相对比三相同步合闸对于抑制直流偏置特性的优势, 并对采用单相顺序延时选相合闸方式时非全相运行期间中性点的过电压进行了校核。

3 结论

主要结论及创新点如下:

1) 首先通过仿真计算结果和试验结果对比, 验证了仿真模型的有效性, 提出了合闸方式、线路补偿度、线路长度、合闸电阻等因素对线路直流偏置特性的交叉影响特性。体现为:

① 偏置电流无过零点时间与合闸时刻紧密相关, 基本上呈正弦函数相关; 通过计算不同线路长度偏置电流随合闸电阻的变化趋势, 可以看出偏置电流无过零点时间随合闸电阻呈负的线性相关, 且不同线路长度(补偿度)下, 其线性斜率基本相同, 理论上可以通过选用不同的合闸电阻值实现对空充电流偏置现象的抑制。

② 线路合空线电流随线路补偿度的变化曲线类似于驼峰曲线, 存在一个峰值, 在低于该补偿度时, 偏置电流无过零点时间与补偿度呈正相关, 在高于该补偿度时, 偏置电流无过零时间与补偿度呈负相关。

③ 不同线路均是在高抗端的偏置电流无过零点时间大于非高抗端的合空线电流无过零时间, 因

此实际合空线中可以选择先合非高抗端再合高抗端的方式减轻带高抗线路空线的直流偏置问题。

④ 采用单相顺序合闸相较于三相同时合闸有明显的优势,对于第一个合闸相 A 相,即便在最严苛工况下均在 1 s 内存在过零点对于第二个合闸相 B 相,其在偏离电压峰值 3 ms 内合闸时,在补偿度小于 90%或大于 120%时,也均在 1 s 内存在过零点。但是对于单相顺序合闸,由于可能在长达 1 s 的时间内非全相运行,需要对中性点小电抗承担的过电压和电流进行校核,经过理论推导得到,当中性点小电抗阻抗值与高抗阻抗值之比小于 0.788 6 即可满足规程要求。

2) 将选相控制技术和基于合闸电流过零点检测的动态延时顺序合闸策略相结合,提出了一种抑制带高抗线路空充电流直流偏置问题的动态延时顺序选相合闸控制方法,有效降低断路器合闸后短期内分闸无法灭弧的风险,提高电力系统稳定。

参考文献

[1] 纪雯. 电力系统设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015, 04.

[2] 杜宁, 徐瑞林, 项祖涛. 带高抗 500 kV 长线路合闸引起的电流直流偏置问题及应对措施[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 200-203.
DU Ning, XU Ruilin, XIANG Zutao. Research on direct current offset caused by switching on 500 kV long-distance transmission lines with high voltage shunt reactors and its countermeasures[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 200-203.

[3] 周沛洪, 戴敏, 娄颖, 等. 1000 kV 交流断路器开断电流的直流分量时间常数和零偏现象[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 722-730.
ZHOU Peihong, DAI Min, LOU Ying, et al. DC component time constant and zero offset phenomena of breaking current for 1000 kV circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 722-730.

[4] 李雨, 徐党国, 孙云生, 等. 应用相控合闸技术抑制并联补偿线路断路器直流偏置问题的研究[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 103-109.
LI Yu, XU Dangguo, SUN Yunsheng, et al. Application of phase control technology in the prevention of DC offset risk of circuit breaker of EHV transmission line with parallel reactance[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 103-109.

[5] 王剑, 朱芸. 500 kV 输电线路断路器合闸电阻配置原则[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 100-103.
WANG Jian, ZHU Yun. Configuration criterion of circuit

breaker closing resistors in 500 kV transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 100-103.

[6] 朱洪波, 杨庆云. 500 kV 电网高压电抗器补偿度的确定, 东北电力技术, 2007, 28(9): 26-27.
ZHU Hongbo, YANG Qingyun. Suggestions on compensation degree of HV reactor for 500 kV power system[J]. Northeast Electric Power Technology, 2007, 28(9): 26-27.

[7] 周志芳. 500 kV 断路器取消合闸电阻问题的研究[J]. 电网技术, 1997, 21(12): 8-11.
ZHOU Zhifang. Research on elimination closing resistor of 500 kV circuit breakers[J]. Power System Technology, 1997, 21(12): 8-11.

[8] 谷定燮, 周沛洪, 李国兴, 等. 取消 500 kV 断路器合闸电阻有关问题的研究[J]. 中国电力, 1996, 29(6): 28-32.
GU Dingxie, ZHOU Peihong, LI Guoxing, et al. Problems related to elimination of pre-insert resistance of 500 kV circuit breaker[J]. Electric Power, 1996, 29(6): 28-31.

[9] 许佳源, 华争祥, 朱苛葵, 等. 选相关合技术抑制空载变压器励磁涌流的实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 135-141.
XU Jiayuan, HUA Zhengxiang, ZHU Kelou, et al. Experimental research on inrush current suppression of unload transformers based on the controlled switching[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 135-141.

[10] 陈川江, 方春恩, 曾俊龙, 等. 计及剩磁的空载变压器选相合闸研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 82-88.
CHEN Chuanjiang, FANG Chunen, ZENG Junlong, et al. Research on unloaded transformer controlled switching considering residual flux[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 82-88.

[11] 曾凡兴, 赵谦, 余祥坤, 等. 变电站高压断路器新型选相控制器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 143-148.
ZENG Fanxing, ZHAO Qian, YU Xiangkun, et al. Study of controlled switching device for high-voltage circuit breaker in substation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 143-148.

[12] 李君明, 臧状, 徐建源. 两起 500 kV 断路器重合失败分析[J]. 东北电力技术, 2013, 34(5): 14-17.
LI Junming, ZANG Zhuang, XU Jianyuan. Analysis of two reclosing failures related to 500 kV circuit[J]. Northeast Electric Power Technology, 2013, 34(5): 14-17.

[13] 方春恩, 梁鸣华, 庞力, 等. 断路器相控开断短路电流智能控制装置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012,

- 40(23): 138-144.
FANG Chunen, LIANG Minghua, PANG Li, et al. Research on intelligent control unit for circuit breakers controlled fault interruption[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 138-144.
- [14] 沃建栋, 郑涛, 万磊, 等. 基于合闸控制策略的变压器励磁涌流抑制措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 32-36.
WO Jiandong, ZHENG Tao, WAN Lei, et al. Study on inrush current suppression method based on the breaker control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 32-36.
- [15] 李伟, 黄金, 方春恩, 等. 基于相控开关技术的空载变压器励磁涌流抑制研究[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 9-13.
LI Wei, HUANG Jin, FANG Chunen, et al. Research on elimination of no-load power transformers inrush currents based on controlled switching[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 9-13.
- [16] 姜殿强, 姚其新. 断路器的相位控制技术及应用[J]. 高压电器, 2008, 44(4): 353-355.
LOU Dianqiang, YAO Qixin. Phase control technology of circuit breaker with application[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4): 353-355.
- [17] 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, 43(2): 113-117.
DUAN Xiongying, LIAO Minfu, DING Fuhua, et al. Application and key technology analysis of controlled switching[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 113-117.
- [18] 宋小翠, 刘志刚, 王英. 基于 ATP-EMTP 的计及高架桥高速铁路过相电磁暂态研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 6-13.
SONG Xiaocui, LIU Zhigang, WANG Ying. Study on electromagnetic transient process in split-phase insulator considering viaduct's electrical coupling based on ATP-EMTP[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 6-13.
- [19] 戚宣威, 尹项根, 李甘, 等. 一种电流互感器仿真分析平台构建方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 69-76.
QI Xuanwei, YIN Xianggen, LI Gan, et al. A construction method for the simulation platform for the analysis of the current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 69-76.
- [20] 陈利翔, 邵振国, 张逸. 电磁式电流互感器谐波比值误差实验与分析[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 977-984.
CHEN Lixiang, SHAO Zhenguo, ZHANG Yi. Experiment and analysis on electromagnetic current transformer harmonic ratio error[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 977-983.
- [21] 杨振华. 电流互感器抗直流性能检测技术研究[D]. 上海: 华东交通大学, 2017.
YANG Zhenhua. Research on detection technology of DC resistance of current transformer[D]. Shanghai: East China Jiaotong University, 2017.
- [22] 赵震宇, 朱亮, 祝婧, 等. 电流直流分量对低压电流互感器计量特性影响的试验研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(20): 44-49.
ZHAO Zhenyu, ZHU Liang, ZHU Jing, et al. Experimental study on the influence of current DC component on the metrological characteristics of low-voltage current transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(20): 44-49.
- [23] 郭耀珠, 石光, 刘华, 等. 保护用电流互感器 10% 误差曲线现场测试及其二次负载校核[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 44-49.
GUO Yaozhu, SHI Guang, LIU Hua, et al. The field test on secondary load of current transformer and the calculation of its 10% error[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 44-49.

收稿日期: 2018-06-11; 修回日期: 2019-01-09

作者简介:

张佳鑫(1988—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电力系统过电压、电磁暂态分析方向的研究; E-mail: 347683632@qq.com

魏颖莉(1984—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事继电保护方向的研究。E-mail: 15130699066@163.com

(编辑 姜新丽)