

变电站10 kV母线旁路转供带电作业研究与仿真

刘培贤, 杨洋, 龙楷, 丁超

云南电网公司玉溪供电局, 云南 玉溪

Email: 514468002.qq.com

收稿日期: 2020年10月6日; 录用日期: 2020年10月21日; 发布日期: 2020年10月28日

摘要

为了研究变电站10 kV母线旁路转供带电作业过程, 同时考虑母线旁路转供带电作业合环、解环前后时刻的暂稳态过程, 本文首先提出基于叠加原理的单位电流法, 实时计算合环操作过程中的循环电流; 接着提出通过提高合环开关两侧母线负荷对称度以及减小合环开关两侧母线电压相量差来提高母线合环转供成功率, 并运用MATLAB/Simulink仿真软件进行验证; 最后采用电弧黑盒模型模拟电弧的暂态特性, 并分别从分闸角、电缆导体截面积、电缆长度、合环开关两侧母线负荷对称度以及合环开关两侧母线电压相量差五个角度, 研究合环开关解环过程对电弧电流的影响因素, 并运用ATP-EMTP仿真软件进行分析研究。

关键词

母线旁路转供, 循环电流, 电弧黑盒模型, 带电作业

Research and Simulation of Live Operation of 10-kV Bus Bypass and Load Transfer in Substation

Peixian Liu, Yang Yang, Kai Long, Chao Ding

Yuxi Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Corporation, Yuxi Yunnan

Email: 514468002.qq.com

Received: Oct. 6th, 2020; accepted: Oct. 21st, 2020; published: Oct. 28th, 2020

Abstract

In order to research the live operation of 10-kV bus bypass and load transfer in substation and

consider the transient steady state process before and after ring closing and ring unwinding, this paper first proposes a unit current method based on superposition principle to calculate the circulating current in the loop closing operation process in real time. Then, it is proposed to improve the success rate of bus turn-over by increasing the load symmetry of bus on both sides of the turn-over switch and reducing the voltage phase difference between bus on both sides of the turn-over switch and use MATLAB/Simulink simulation software to verify. Finally arc black box model are adopted to simulate the transient characteristics of arc, and respectively from five angles: the brake angle, cable conductor cross-sectional area, length of cable, closed loop switch on both sides of the bus load switch with symmetry and closed loop on both sides of the bus voltage phasor differential, the influence factors of the closed loop switch power network process on the arc current are analyzed, and ATP-EMTP simulation software is used for analysis.

Keywords

Bus Bypass and Load Transfer, Circulating Current, Arc Black Box Model, Live Operation

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

随着社会各领域用电需求的提高, 负荷种类日益增多, 配电网系统的运行方式需频繁调整以满足负载要求, 保证变电站的负载均衡[1]。当主变出现故障或者过载问题时, 需要考虑进行负荷转供[2]。此外, 由于变电站内设备如断路器等需要定期进行检修维护, 为了保证用户的供电可靠性, 也常常需要进行母线负荷转供的带电作业。

110 kV 及以下配电网主要通过合环方式来实现不停电转供, 以减少停电时间, 提高供电可靠性[3]。母线负荷转供带电作业过程中, 由于进行合环操作, 常常会引起线路电流变化, 可能会导致超出设备容量限额影响系统的正常运行。合环转供工作结束时, 需要对合环开关进行解环操作, 而带电断接电缆极易产生电弧, 严重危害操作人员的安全。因此, 为了降低带电作业过程的风险, 有必要对变电站母线旁路转供的带电作业过程进行研究。

目前学者们在负荷转供方面已经进行了大量研究[1]-[6]。文献[1]考虑了转供开关操作的时序问题并提出了一种转供风险评估方法; 文献[2]采用电网设备过载辅助决策在线计算负荷转供措施, 考虑设备的过载安全裕度确定负荷调整方案; 文献[4]结合配电灵活交流输电设备, 提出了一种兼顾故障馈线残余负荷以及非故障馈线安全运行约束的负荷快速在线转供策略; 为了同时兼顾转供能力及系统综合指标, 文献[5] [6]提出了进行二次转供方案。

在解环操作过程中, 由于电弧产生时的现场数据难以测量, 因此, 建立准确合适的电弧模型极为重要。文献[7]认为在开关操作过程中会产生电弧, 而电磁暂态的特征取决于电弧的预击穿、重燃和熄灭等物理放电过程; 文献[8]针对 SF6 断路器小电流开断过程中温度梯度、各粒子密度梯度较大等现象, 建立了小电流条件下非平衡态双温度电弧模型; 文献[9] [10]建立了 Mayer 电弧模型; 为了快速熄灭电弧, 文献[11]研究了一种基于抑制建弧率的新型喷射气流灭弧防雷间隙, 建立了喷射气流耦合暂态电弧模型, 得出了电弧熄灭判据; 文献[12]对电弧在真空灭弧室中的自由恢复过程进行研究, 通过研究不同的灭弧室材

料、结构寻找可行的灭弧装置。

然而，目前同时考虑母线旁路转供电作业合环、解环时刻前后的暂稳态过程较少。为此，本文提出了能够实时测量转供线路循环电流的单位电流法，采用提高合环开关两侧母线负荷对称度以及调整变压器分接头措施来提高合环转供成功率，利用 MATLAB/Simulink 进行仿真验证；接着建立了电弧黑盒模型，采用 ATP-EMTP 软件搭建了断开合环开关时的电弧电流仿真模型，分析了电弧电流暂态过程及影响因素，为变电站 10 kV 母线旁路转供电作业提供了一定的理论基础。

2. 单位电流法实时计算循环电流

本文采用的单位电流法基于叠加原理的思想，能够在母线负荷转供的过程中，实时计算循环电流，避免计算节点阻抗矩阵，更加具有实用性，其原理如图 1 所示。

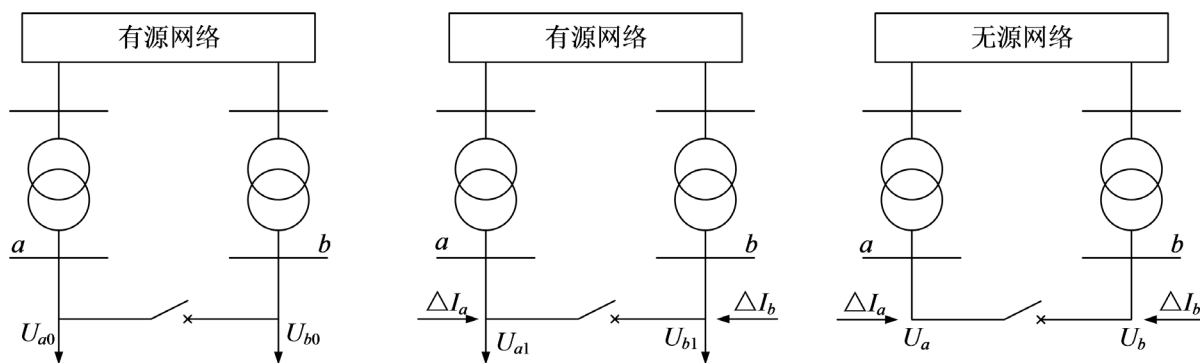


Figure 1. Schematic diagram of unit current method
图 1. 单位电流法原理图

基于叠加原理的单位电流法实时计算循环电流步骤如下：① 首先在进行合环转供之前，测量得到母线 a 、 b 的电压 U_{a0} 、 U_{b0} ；② 接着仅向母线 a 、 b 内注入相位相反的单位电流，并获得此时母线 a 、 b 的电压 U_{a1} 、 U_{b1} ；③ 最后结合叠加原理，构造出无源网络，并对无源网络进行计算。求取循环电流的过程如下。

$$\Delta \dot{U}_a = \dot{U}_{a1} - \dot{U}_{a0} \quad (1)$$

$$\Delta \dot{U}_b = \dot{U}_{b1} - \dot{U}_{b0} \quad (2)$$

$$Z_\Sigma = \frac{\Delta \dot{U}_a - \Delta \dot{U}_b}{\dot{I}_e} = \Delta \dot{U}_a - \Delta \dot{U}_b \quad (3)$$

$$I_{\text{循环}} = \frac{\dot{U}_{a0} - \dot{U}_{b0}}{Z_\Sigma} \quad (4)$$

式中， ΔU_a 、 ΔU_b 为注入单位电流前后的电压向量差； I_e 为单位电流； Z_Σ 为系统等值阻抗； $I_{\text{循环}}$ 为循环电流。

基于上述原理分析，利用 MATLAB/Simulink 搭建的单位电流法仿真模型如图 2 所示。

为了简化分析过程，只取 A 相进行研究计算。根据上述步骤测量得出各数据如下表所示。

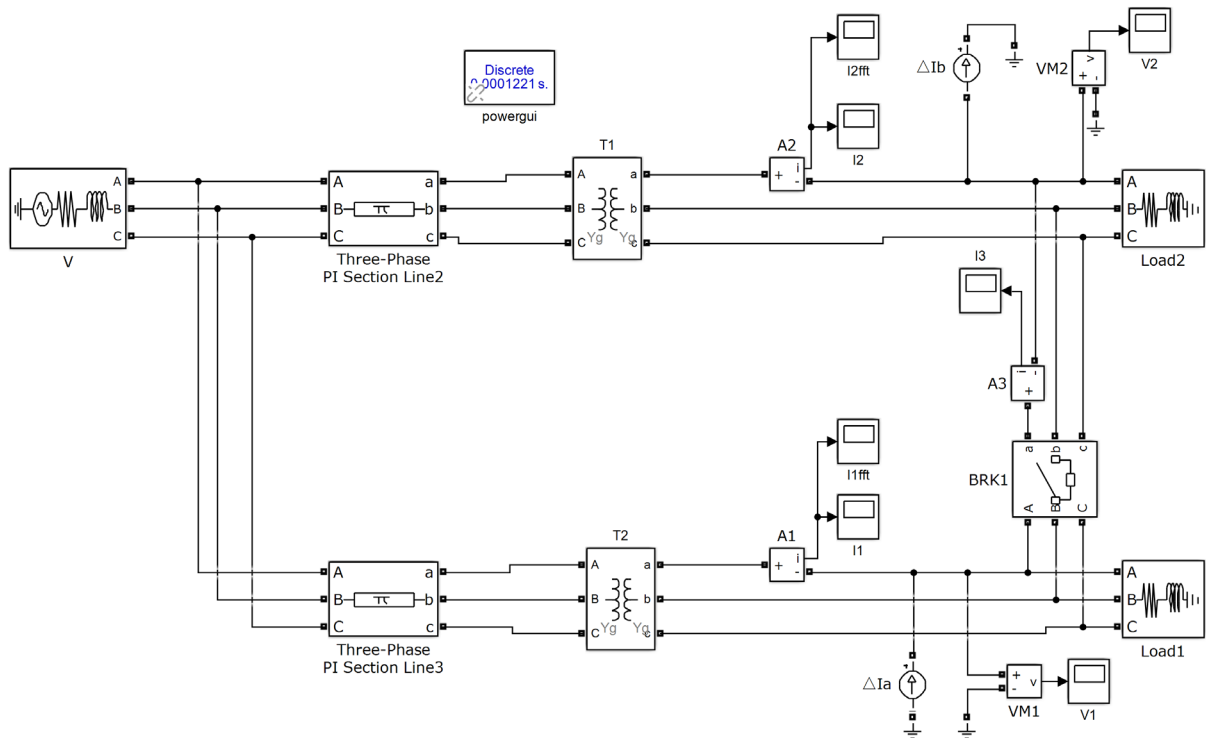


Figure 2. Simulation circuit diagram of unit current method based on superposition principle

图 2. 基于叠加原理的单位电流法的仿真电路图

Table 1. Voltage phasor measurement values

表 1. 电压相量测量值

电压	电压相量(V)	电压	电压相量(V)
U_{a0}	$8860.450 \angle -1.596\text{rad}$	U_{a1}	$8860.461 \angle -1.596\text{rad}$
U_{b0}	$8513.553 \angle -1.587\text{rad}$	U_{b1}	$8513.547 \angle -1.587\text{rad}$

Table 2. Simulation results

表 2. 仿真计算结果

电流	计算电流值(A)
$I_{\text{循环}}$ 理论值	1463.066
$I_{\text{循环}}$ 计算值	1425.611
误差	2.56%

仿真结果分析：通过分析表 1 和表 2 中的数据， $I_{\text{循环}}$ 的计算误差只有 2.56%，表明单位电流法实时计算循环电流的计算精度较高，能够满足实际工程需要。

如果将表中的数据均保留到小数点的后四位，再次进行误差分析，所得的误差将高达 1349.1%。原因是注入单位电流前后，节点 a 和 b 处电压变化的幅度较小，数据的有效位数较少，会导致与实际计算结果有很大的偏差。 $I_{\text{循环}}$ 存在 2.56% 的误差来源有如下 3 个主要因素：① Simulink 的仿真计算理论上并非绝对精确，其本身存在一定的误差；② 表中所获得的测量值并非真实值，而是经过化简的近似值，其有效位数越多，误差就越小；③ 利用 FFT 模块计算电压的幅相特性时也并非精确值。

3. 提高母线合环转供成功率研究

为了能够顺利地进行合环转供，目前比较常见的提高母线合环转供成功率的操作方法主要有负荷控制与变压器分接头调整。

3.1. 负荷控制原理分析

利用图 3 对负荷控制的原理进行分析。图中开关处于闭合状态， U_{AH2} 、 U_{BH2} 、 U_{AL2} 、 U_{BL2} 为变压器 T_1 和 T_2 的高、低压侧电压； S_{AH2} 、 S_{BH2} 、 S_{AL2} 、 S_{BL2} 为流入、流出变压器 T_1 和 T_2 的功率； Z_{T1} 和 Z_{T2} 为变压器的内阻； S_A 、 S_B 为两条母线所带的负荷； ΔS 为转供线路上流动的功率。

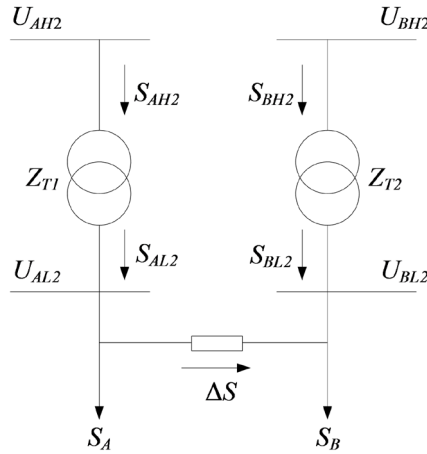


Figure 3. Load control schematic
图 3. 负荷控制原理图

结合上图可以计算 U_{AH2} 、 U_{BH2} 为：

$$U_{AH2} = U_{AL2} + \Delta U_{T12} = U_{AL2} + Z_{T1} \frac{S_{AL2}}{U_{AL2}} \quad (5)$$

$$U_{BH2} = U_{BL2} + \Delta U_{T12} = U_{BL2} + Z_{T2} \frac{S_{BL2}}{U_{BL2}} \quad (6)$$

认为转供线路阻抗为 0，可得 $U_{AL2} = U_{BL2} = U_{L2}$ ，则 U_{AH2} 和 U_{BH2} 之差 ΔU_{H2} 可以表示为：

$$\Delta U_{H2} = U_{AH2} - U_{BH2} = \frac{S_{AL2}Z_{T1} - S_{BL2}Z_{T2}}{U_{L2}} \quad (7)$$

由图 3 可知，流入母线 a 、 b 的功率和 S_{Σ} 、转供线路上流动的功率 ΔS 和循环电流 I_c 可表示为：

$$S_{\Sigma} = S_{AL2} + S_{BL2} = S_A + S_B \quad (8)$$

$$\Delta S = S_{AL2} - S_A = S_B - S_{BL2} \quad (9)$$

$$I_c = \frac{\Delta S}{U_{L2}} \quad (10)$$

联立式(7)至式(10)可得转供时的循环电流表达式为：

$$I_c = \frac{S_A Z_{T1} - S_B Z_{T2} - \Delta U_{H2} U_{L2}}{(Z_{T1} + Z_{T2}) U_{L2}} \quad (11)$$

分析式(11)可知：式中 Z_{T1} 、 Z_{T2} 是变压器的固有参数，无法改变；而当 S_A 与 S_B 的差值越小时，代入上式计算所得的合环电流就越小，因此可以根据这个思路来减小合环转供时的循环电流值。

3.2. 负荷控制提高母线合环转供成功率仿真研究

利用 MATLAB/Simulink 搭建负荷控制提高母线合环转供成功率的仿真电路图如图 4 所示。采用控制变量原则进行仿真分析负荷控制与合环电流大小的关系。

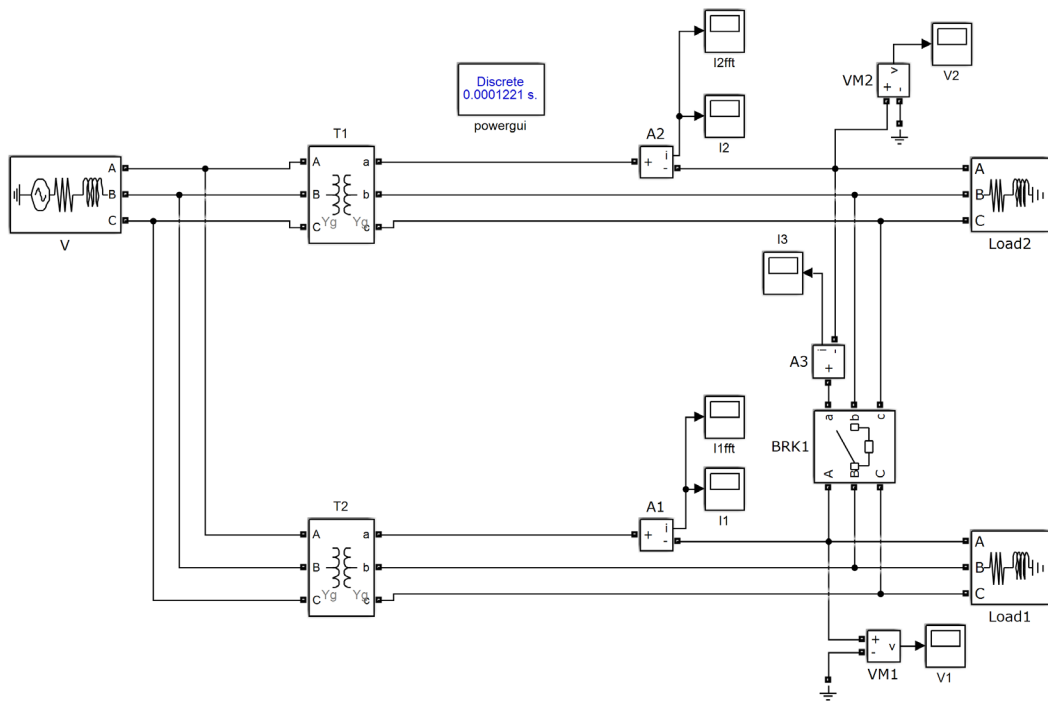


Figure 4. Simulation circuit diagram of load control effect on circulating current

图 4. 负荷控制对合环电流影响的仿真电路图

母线 1 所带的负荷为 $13 + 4.5i$ MV·A，母线 2 所带的负荷为 $18 + 7.5i$ MV·A。通过控制变量法提高两侧母线负荷对称度，并进行仿真实验。

设置负荷增长步长为 1 MW，仿真得到合环过程的冲击电流、循环电流值如图 5 与图 6 所示。

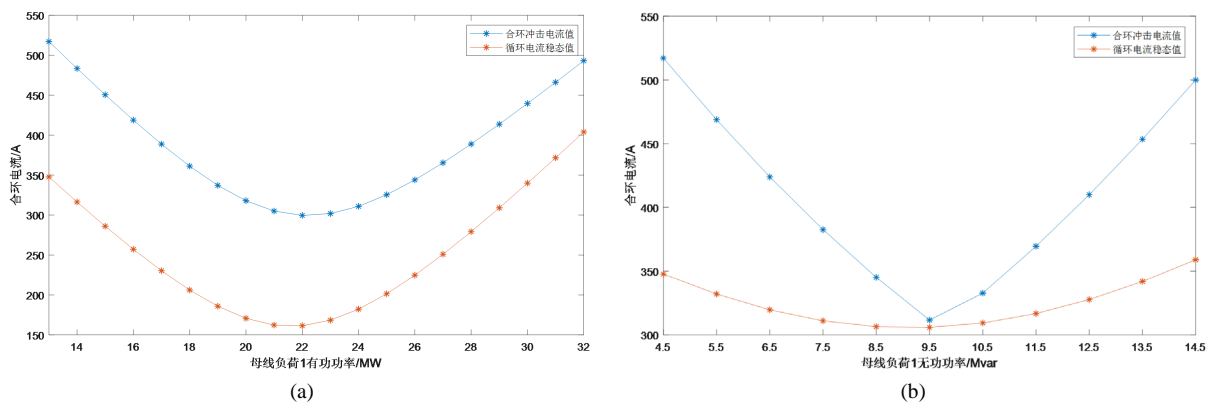


Figure 5. Bus 1 load control: (a) Active control; (b) Reactive control

图 5. 母线 1 负荷控制(a) 有功控制；(b) 无功控制

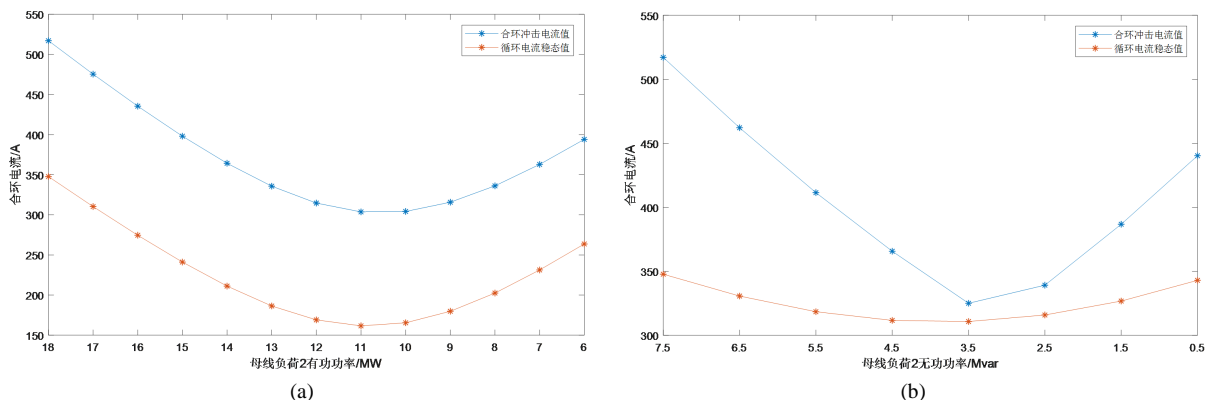


Figure 6. Bus 2 load control: (a) Active control; (b) Reactive control

图 6. 母线 2 负荷控制(a) 有功控制; (b) 无功控制

仿真结果分析可知，最大程度地提高合环开关两侧母线负荷对称度，例如母线 1 负荷有功功率调整至 22 MW 或无功功率调整至 9.5 Mvar 时，能够最大程度地减小冲击电流与循环电流。但是，合环电流会随着母线 1 负荷的继续增大而开始增大，与本文所述的控制合环开关两侧母线负荷对称性提高母线合环转供成功率的方法相同。

然而为了满足实际需求，工程上负荷的投切量具有限值，负荷调整步长更小，因此图 5 与图 6 的前半部分，即单调递减曲线部分与工程实际更加贴近。

3.3. 变压器分接头调整原理分析

另一个有效的办法是调整变压器的分接头从而达到减小合环开关两侧母线的电压幅值差，以达到减小合环电流的目的。变压器分接头调整的原理分析如图 7 所示。

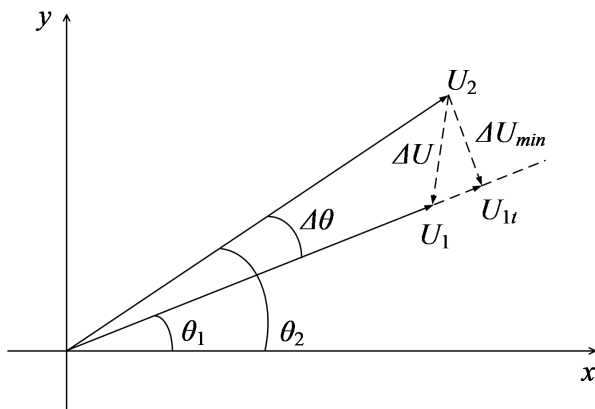


Figure 7. Voltage phasor diagram for transformer tap adjustment

图 7. 变压器分接头调整电压相量图

如图 7 所示，为了减小合环开关两侧母线电压相量差，可以增大母线 1 的电压幅值或者减小母线 2 的电压幅值。以图 7 为例进行分析，初始母线 1 的电压相量为 $U_1 \angle \theta_1$ ，母线 2 的电压相量为 $U_2 \angle \theta_2$ ，两条母线的电压相角差为 $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ 。对变压器分接头进行调整能够改变母线的电压幅值而不能改变电压相角，调整母线 1 上的变压器分接头即可改变母线 1 的电压。为得到最小的循环电流，需要调整变压器的分接头使得两侧母线的电压差达到最小值 ΔU_{min} ，可调整母线 1 的电压至 U_{1t} ，此时 U_{1t} 为电压相量 U_2 对电压相量 U_1 进行的投影。变压器分接头的调整参照下式：

$$k = \frac{U_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) - U_1}{U_1} \quad (12)$$

3.4. 变压器分接头调整提高母线合环转供成功率仿真研究

利用图 4 进行变压器分接头调整提高母线合环转供成功率仿真实验研究。图中变压器 T_1 和 T_2 的分接头调整档位为 $110 \text{ kV} \pm 5 \times 1.25\% / 10.5 \text{ kV}$ 。通过仿真调整母线 1 侧的变压器分接头，记录合环电流随变压器分接头的变化如图 8 所示。

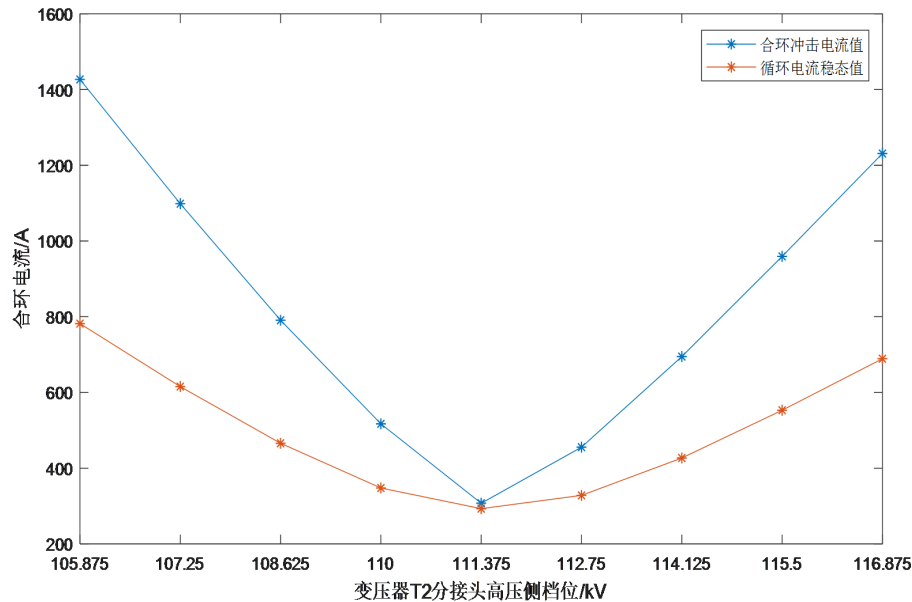


Figure 8. The circulating current during tap adjustment
图 8. 分接头调整过程中合环电流大小

仿真结果分析：两条母线的初始电压 U_1 为 $8.745 \angle -1.619 \text{ rad}$ 、 U_2 为 $8.628 \angle -1.640 \text{ rad}$ ，结合式(12)解得 $k = -0.0136$ ，即母线 1 侧的变压器分接头调整为 $111.375 \text{ kV} / 10.5 \text{ kV}$ 档位时可使两侧电压相量差值最小，由图 8 可知，母线 1 侧的变压器分接头调整为该档位时合环冲击电流和循环电流最小，可知调整变压器分接头能够起到提高母线合环转供成功率的作用。

4. 合环开关解环过程中影响电弧电流仿真研究

在进行合环转供操作之后，通常需要对合环开关进行解环操作。然而在解环过程中，很容易产生电弧电流，严重时可能会危及工作人员的安全，因此对合环开关解环过程中的电弧电流的研究非常重要。本次研究采用电弧黑盒模型来描述电弧的特性，具体电弧模型表达式如式(13)所示[13]。

$$u_a(t) = u_{a0}(t) \left[1 + A e^{B(t-T_i)} h(t-T_i) \right] \quad (13)$$

式中， $u_a(t)$ 为电弧电压； $u_{a0}(t)$ 为电弧长度为某一常数时的电弧电压； A 和 B 为决定弧长改变量的参数； T_i 为电弧开始时间； $h(t)$ 是赫维赛德函数。

利用 ATP-EMTP 软件建立的电弧黑盒模型如图 9 所示，图中 Type-91R(t) 是模拟电弧电阻，可以起到动态地改变电阻值的作用；MODELS 为 ATP-EMTP 中的一种综合性编辑工具，可以在其内部编写程序进而控制 Type-91R(t) 的电阻值，二者结合可以模拟电弧电阻的动态变化。

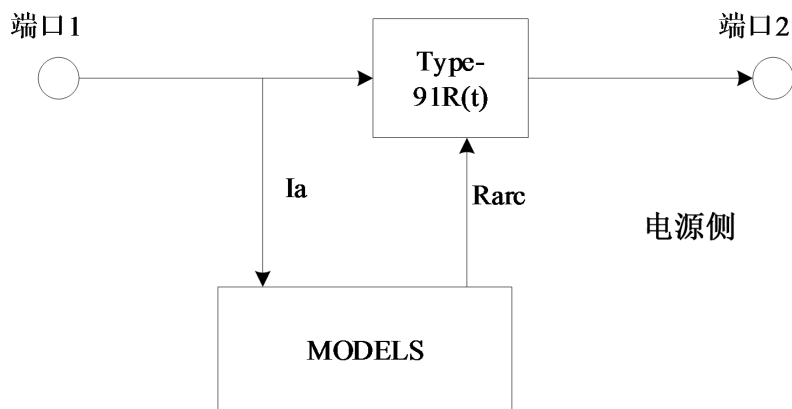


Figure 9. Arc model diagram in ATP-EMTP
图 9. ATP-EMTP 中的电弧模型图

利用 ATP-EMTP 软件建立断开旁路转供合环开关时的电弧电流仿真电路如图 10 所示。

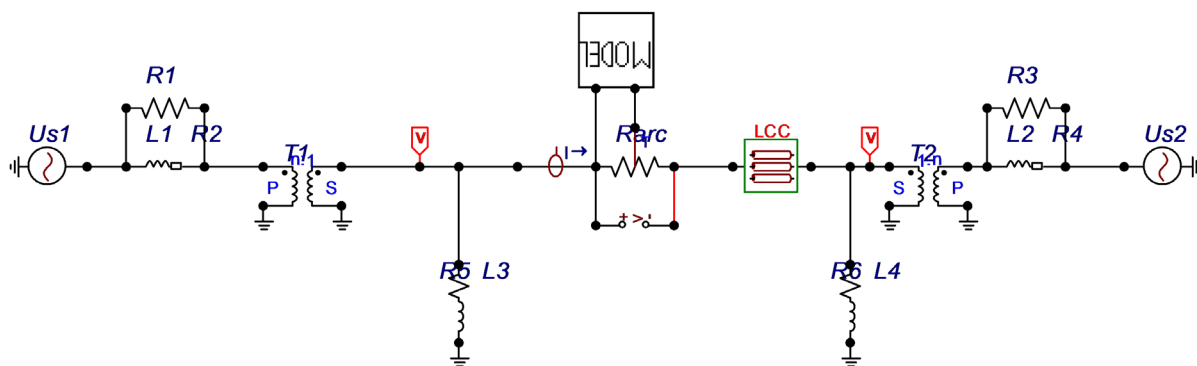


Figure 10. Simulation diagram of arc current when the turn-over switch is opened in ATP-EMTP
图 10. ATP-EMTP 中断合环开关时的电弧电流仿真图

图中 LCC 表示埋于地下 1 m，型号为 YJV22，长度为 2000 m，截面积为 300 mm² 的电缆；电源 U_{s1} 的电压幅值为 110 kV，A 相的初相角为 0°；电源 U_{s2} 电压幅值为 110 kV，A 相的初相角为 -1°； R_1 、 R_2 、 L_1 、 R_3 、 R_4 、 L_2 表示合环开关两侧母线上级系统的等效总阻抗，其值分别为 $R_1 = 100 \Omega$ ， $R_3 = 200 \Omega$ ， $R_2 = R_4 = 1 \Omega$ ， $L_1 = L_2 = 23.2 \text{ mH}$ ； T_1 和 T_2 为 110 kV/10.5kV 等级的理想变压器； R_5 、 L_3 、 R_6 、 L_4 表示两母线所带的负荷，用阻抗表示，其值分别为 $R_5 = 10 \Omega$ ， $R_6 = 6 \Omega$ ， $L_3 = 12 \text{ mH}$ ， $L_4 = 8 \text{ mH}$ ；电弧参数为： $U_a = 10 \text{ V}$ ， $U_b = 12 \text{ V}$ ， $I_0 = 2000 \text{ A}$ ， $R_s = 0.015 \Omega$ ， $A = 0.45$ ， $B = 5.25/\text{s}$ ；设电弧产生时间 $T_{open} = 0.1 \text{ s}$ 。

电弧电流的大小会受到分闸角、电缆导体层截面积、电缆长度的影响，此外根据第 3 节研究可知合环开关两侧母线负荷对称度、合环开关两侧母线电压相量差能够影响循环电流的大小，因此对电弧电流也有影响。针对上述五种影响因素，对母线负荷转供解环过程进行仿真实验，分析各种影响因素对电弧电流的影响情况。

4.1. 分闸角对电弧电流的影响仿真

在 ATP-EMTP 软件中调整电弧黑盒模型接入电路的时间进而调整分闸角的大小。当分闸角为 0° 和分闸角为 120° 时的电弧电流波形图如图 11 所示，其他分闸角电弧电流仿真情况如表 3 所示。

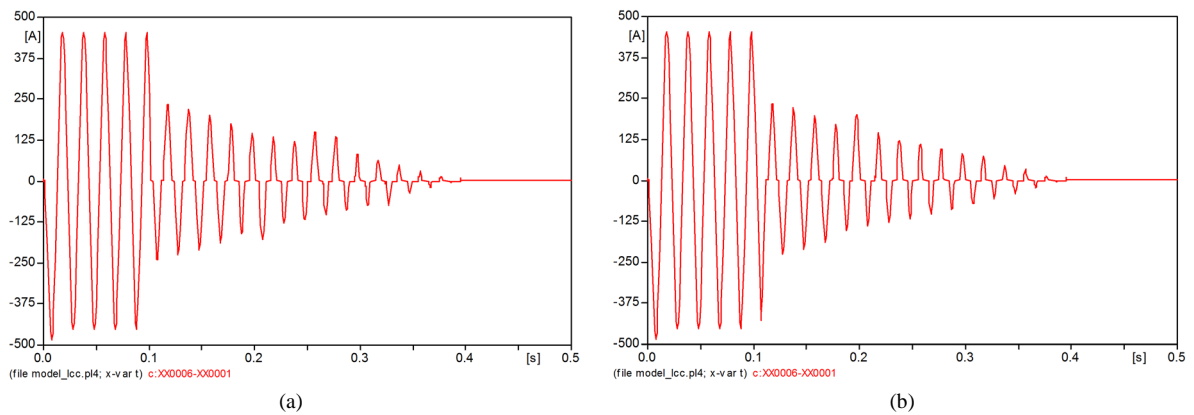


Figure 11. Arc current waveform at different opening angles (a) Opening angle is 0° ; (b) Opening angle is 120°

图 11. 不同分闸角下电弧电流波形(a) 分闸角为 0° ; (b) 分闸角为 120°

Table 3. Effect of different opening angles on arc current

表 3. 不同分闸角对电弧电流的影响

参数	数值						
分闸角($^\circ$)	0	30	60	90	120	150	180
电弧电流有效值(A)	60.99	58.05	59.30	62.77	63.13	63.99	63.86

结合表 3 进行分析可知, 合环开关分闸产生电弧的暂态过程中, 随着分闸角的变化, 电弧燃烧时间段内电弧电流有效值的变化幅度较小, 在 58.05 A 到 63.99 A 范围内变化。分闸角为 150° 时达到最大, 分闸角为 30° 时达到最小, 总体变化趋势为先减小再增大再减小。从表 3 中可以得出分闸角对母线负荷转供解环暂态过程中的电弧电流的影响较小。

4.2. 电缆导体截面积对电弧电流的影响仿真

在 ATP-EMTP 软件中通过调整电缆模型的导体层半径进而调整截面积的大小, 当导体层半径为 12 mm 和 24 mm 时的电弧电流波形如图 12 所示, 其他电缆导体层半径下的电弧电流仿真情况如表 4 所示。

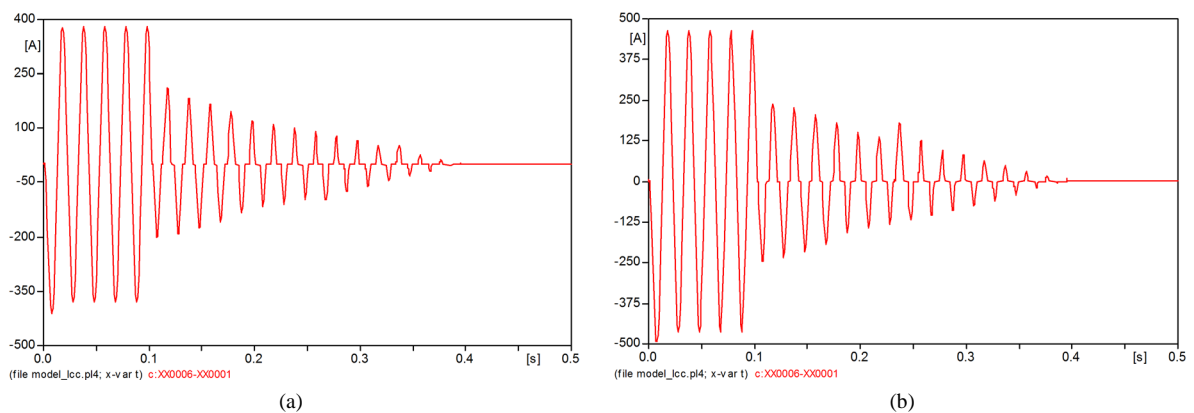


Figure 12. Arc current waveform under different conductor layer radius: (a) Radius is 12 mm; (b) Radius is 24 mm

图 12. 不同导体层半径下的电弧电流波形(a) 半径为 12 mm; (b) 半径为 24 mm

Table 4. Effect of different conductor layer radius on arc current
表 4. 不同导体层半径对电弧电流的影响

参数	数值										
导体层半径(mm)	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
电弧电流有效值(A)	49.63	52.92	55.00	57.97	58.76	60.34	62.32	64.84	65.21	66.09	66.68

对表 4 进行分析可知, 电缆导体层半径增大时即电缆的截面积增大时, 电弧电流有效值随着电缆截面积的增大逐渐增大。随着电缆导体层半径增大的前期, 电弧电流有效值增大较快; 随着电缆导体层半径增大的后期, 电弧电流有效值增大开始减缓。电弧电流有效值在 49.63 A 到 66.68 A 范围内变化, 总体变化趋势为单调增大, 因此电缆截面积能够在一定程度上起到影响电弧电流的作用。

4.3. 电缆长度对电弧电流的影响仿真

在 ATP-EMTP 软件中调整电缆模型的电缆长度研究对电弧电流的影响, 当电缆长度等于 1 km 和 4 km 时的电弧电流波形图如图 13 所示, 其他电缆长度下的电弧电流仿真情况如表 5 所示。

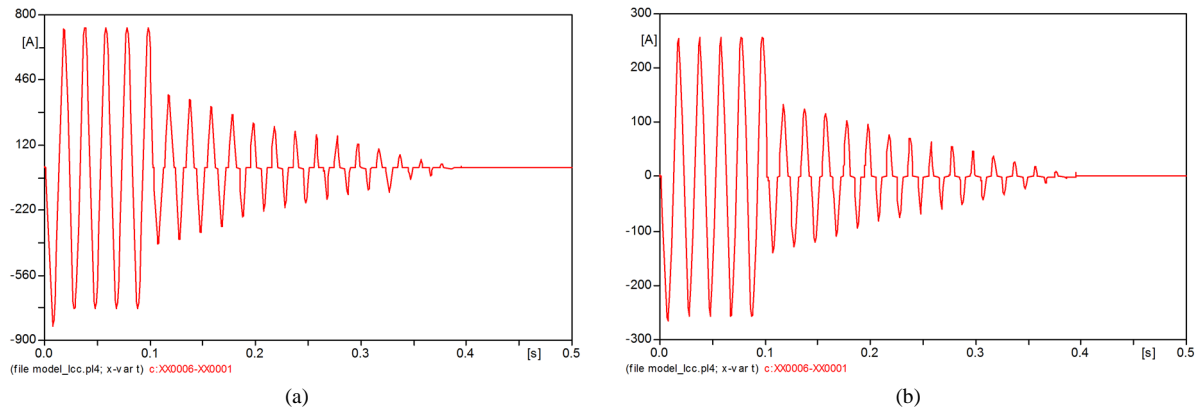


Figure 13. Arc current waveform at different cable lengths: (a) Cable length is 1 km; (b) Cable length is 4 km
图 13. 不同电缆长度下的电弧电流波形(a) 电缆长度为 1 km; (b) 电缆长度为 4 km

Table 5. Effect of different cable lengths on arc current
表 5. 不同电缆长度对电弧电流的影响

参数	数值					
电缆长度(km)	0.1	0.3	0.5	1	2	4
电弧电流有效值(A)	244.2	191.1	151.6	102.4	65.32	35.46

对表 5 进行分析可知, 电弧电流有效值随着电缆长度的增大而迅速减小。电缆长度的变化使得电弧电流有效值也受到了巨大的影响, 变化幅度很大, 总体变化趋势为单调减小。因此可知电缆长度对电弧电流有效值的影响很大。

4.4. 合环开关两侧母线负荷对称度对电弧电流的影响仿真

调整 ATP-EMTP 模型中母线 1 或母线 2 负荷的大小, 进而调整合环开关两侧母线负荷对称度, 图 14 和图 15 分别为调整母线 1 负荷及母线 2 负荷电阻或电抗值大小时的电弧电流有效值变化情况。

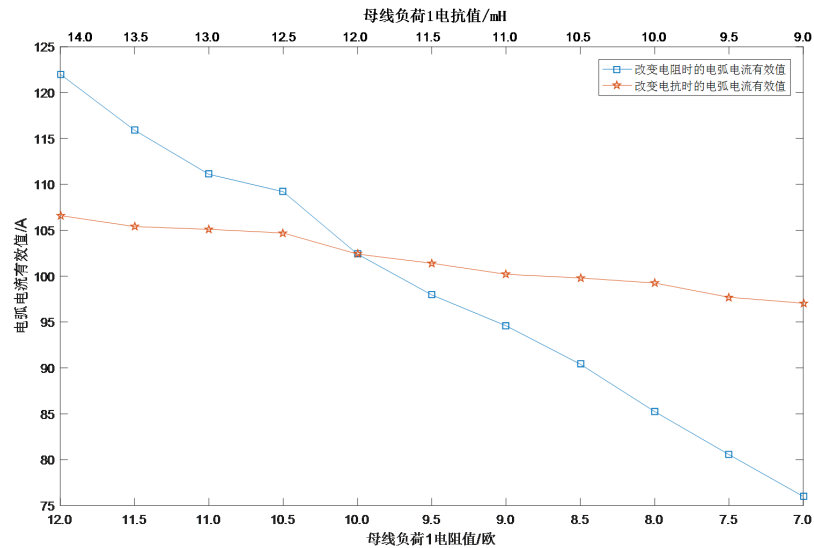


Figure 14. Effective value of arc current when adjusting bus 1 load

图 14. 调整母线 1 负荷时的电弧电流有效值

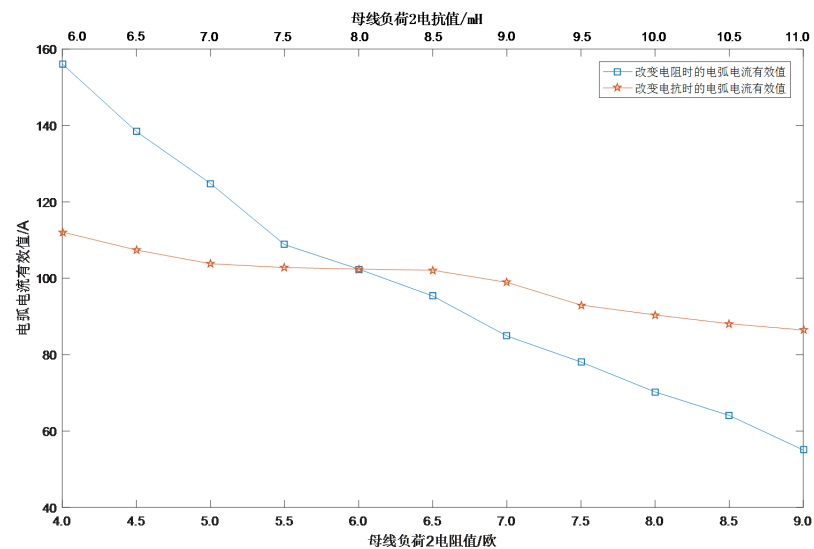


Figure 15. Effective value of arc current when adjusting busbar 2 load

图 15. 调整母线 2 负荷时的电弧电流有效值

根据控制变量原则仿真分析电弧电流有效值大小与负荷改变值的关系可知：通过控制母线 1 负荷的电阻减小，母线 1 负荷的电抗减小，母线 2 负荷的电阻提高，母线 2 负荷的电抗提高使合环点两侧负荷趋于对称，能减小母线负荷转供解环过程中的电弧电流有效值大小。

4.5. 调整变压器分接头对电弧电流的影响仿真

调整 ATP-EMTP 模型中变压器 T_1 或 T_2 的分接头，进而调整合环开关两侧母线的电压相量差，图 16 变压器 T_1 及 T_2 分接头调整过程中电弧电流有效值变化情况。

由图 16 可知，两台变压器分接头档位均在 110 kV/10.5kV 时，合环开关两侧电压相量差最小，母线负荷转供解环过程时有最小的电弧电流有效值，与第 3 节所研究的变压器分接头调整对循环电流大小的影响有相同的关系。

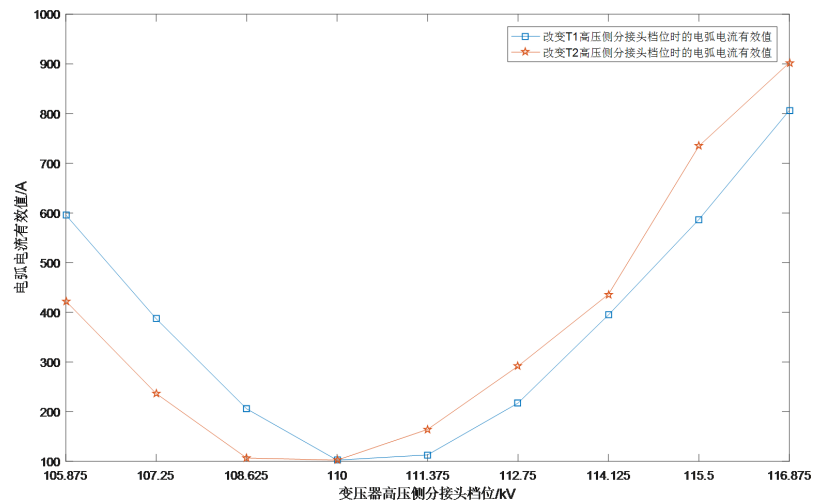


Figure 16. Effective value of arc current when adjusting transformer tap

图 16. 调整变压器分接头时的电弧电流有效值

5. 结论

本文对变电站 10 kV 母线旁路转供电作业过程进行仿真分析, 同时考虑母线旁路转供电作业合环、解环时刻前后的暂稳态过程。由于实验条件有限, 下一步工作可以进行实验测试来验证仿真模型的有效性。

主要研究结论如下:

1) 本文所提出的单位电流法避免了计算系统的节点阻抗矩阵, 具有能够实时计算循环电流大小的优点; 通过对合环开关两侧母线负荷进行负荷控制, 提高合环开关两侧母线负荷对称度, 以及调整合环开关两侧变压器分接头, 减小合环开关两侧母线电压相量差的措施, 可以减小循环电流大小, 能够有效提高母线合环转供的成功率;

2) 电弧黑盒模型能够很好地模拟电弧电流的暂态特性。合环开关解环过程中分闸角对电弧电流的影响不大, 而电缆导体截面积、电缆长度、合环开关两侧母线负荷对称度以及合环开关两侧母线电压相量差对电弧电流的影响很大。

参考文献

- [1] 李红伟, 刘宇陆, 金勇, 等. 高压配电网负荷转供中的开关动作时序判定策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 82-90.
- [2] 周晓宁, 徐伟, 胥传普, 等. 计及负荷转供措施的电网设备过载辅助决策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 61-66.
- [3] 章坚民, 相炜, 罗刚, 等. 配电网 30°相角差线路不停电转供的解决方案及关键分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 74-81.
- [4] 祝旭焕, 童宁, 林湘宁, 等. 基于柔性多状态开关的主动配电网负荷在线紧急转供策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 87-101.
- [5] 马静, 马伟, 王增平. 基于联络关系的主变故障负荷转供方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 1-7.
- [6] 章立宗, 吴磊, 蒋玮, 等. 考虑二次转供的配电网负荷转供方案多目标优选技术[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2321-2328.
- [7] 闫格, 吴细秀, 田芸, 等. 开关电弧放电电磁暂态干扰研究综述[J]. 高压电器, 2014, 50(2): 119-130.
- [8] 林莘, 王亮, 徐建源, 等. 非平衡态双温度 SF₆ 等离子体电弧数学模型研究[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 1-7.

-
- [9] 韩力, 周鑫, 李籽剑, 等. 基于 Mayer 电弧模型固相气流对电弧熄灭的有效性分析[J]. 电瓷避雷器, 2020(3): 74-80.
- [10] 许晔, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 57-64.
- [11] 王巨丰, 刘津濂, 刘其良, 等. 基于抑制建弧率的新型喷射气流灭弧防雷间隙机理研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2862-2870.
- [12] Wang, Z.X., Geng, Y.S. and Liu, Z.Y. (2012) Stepwise Behavior of Free Recovery Processes after Diffused Vacuum Arc Extinction. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **19**, 582-590.
<https://doi.org/10.1109/TDEI.2012.6180253>
- [13] 罗益珍, 胡志坚, 雷文杰, 等. 带电分闸 10 kV 空载电缆电弧暂态过程研究[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 172-178.