

Research on Calculation Method and Reduction Measures of Circulating Current in Closing Loop Operation in Distribution Network

Peixian Liu¹, Yang Yang¹, Gongshuai Zhang¹, Jingyu He², Zhijian Hu²

¹Yuxi Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Company, Yuxi Yunnan

²School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan Hubei

Email: zhijian_hu@163.com

Received: Jun. 3rd, 2018; accepted: Jun. 22nd, 2018; published: Jun. 29th, 2018

Abstract

In order to reduce the risk of distribution network operation, this paper calculates the power flow of distribution network based on the equivalent circuit diagram of distribution network, studies the calculation method of circulating current caused by loop closing operation of distribution network is studied, and puts forward a load control strategy to reduce circulating current, then uses the MATLAB/Simulink simulation software to build a simulation model of the operation of the distribution network, and the proposed control strategy to reduce the circulating current is simulated. The results verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords

Distribution Network, Closing Loop Operation, Circulating Current Calculation, Control Strategy

配电网合环操作中的循环电流计算方法与降低措施研究

刘培贤¹, 杨洋¹, 张弓帅¹, 何靖宇², 胡志坚²

¹云南电网公司玉溪供电局, 云南 玉溪

²武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉

Email: zhijian_hu@163.com

收稿日期: 2018年6月3日; 录用日期: 2018年6月22日; 发布日期: 2018年6月29日

摘要

为了降低配电网合环操作的风险,本文基于配电网合环等值电路图进行了配电网潮流计算;研究了配电网合环操作引起的循环电流的计算方法,提出了降低循环电流的控制策略;然后运用MATLAB/Simulink仿真软件,搭建了配电网合环操作仿真模型,对本文提出的降低循环电流的控制策略进行了仿真。仿真结果验证了本文所提方法的有效性。

关键词

配电网, 合环操作, 循环电流计算, 控制策略

Copyright © 2018 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

1. 引言

根据配电网合环操作的研究资料,负荷转供作业的风险主要来自于合环操作引起的线路电流变化[1],合环后线路电流有可能因为超过设备容量限额或不能满足继电保护要求导致继电保护动作进而影响电力系统供电可靠性[2]。因此研究合环引起的循环电流计算方法以及提出能有效降低循环电流的措施对负荷转供作业具有重要意义。

目前我国对循环电流计算的一般方法是将合环系统等效成戴维南电路,电路中的等效电源为合环点两侧电压相量差,等效阻抗为从合环点两侧节点往系统上级看进去的等效阻抗[3]。由于合环点两侧电压相量差可以通过SCADA数据采集系统直接获取,因此循环电流的计算难度主要在等效阻抗上。目前一般是通过电力系统调度部门提供网络节点阻抗参数,再由合环点两侧节点的自阻抗减去互阻抗近似求得[4]。该方法虽然简单快捷,但是考虑系统的运行方式会有变更,该方法不能实时计算出准确的系统等效阻抗,因此本文重点研究满足工程实时测量需求的系统等效阻抗测量方法。

在计算出循环电流后,若循环电流大小不满足作业条件,则需要采取一定的有效措施降低循环电流。研究表明影响循环电流的主要因素包括合环点两侧电压相量差、主变参数、线路参数以及合环点两侧出线所带负荷的情况[5]。针对合环点两侧电压相量差因素,目前调整变压器分接头法是最为常用和有效的方法[6]。对于一个实际的配电网,其网络中的主变和线路参数已经选定,因此本文重点研究通过负荷控制实现循环电流的降低。目前国内针对负荷控制提出的一般策略为在负荷低谷期进行合环[7]。实际操作中该策略要求合环时刻选取在当地负荷低谷时段,作业需要考虑时间条件的配合,不适用于急需合环的作业情况。

为了解决上述问题,本文建立了配电网合环等值电路图,研究能实时测量系统等效阻抗并计算合环循环电流的方法,并基于潮流的计算分析研究了负荷对出线上循环电流的影响,提出了通过降低负荷功率以提高合环点两侧负荷对称性的负荷控制策略。并通过MATLAB/Simulink软件进行了仿真和计算,仿真结果表明所提的循环电流计算方法是正确的以及降低措施是有效的。

2. 循环电流实时计算方法研究

为了满足负荷转供作业中实时计算循环电流的要求,本文提出基于叠加原理的电流注入法,该方法可以不需要通过形成节点阻抗矩阵 $Z_{n \times n}$ 来计算等值阻抗,计算过程相比目前所用的节点阻抗矩阵法更加

直观且满足实时性。基于叠加原理的电流注入法等效图如图 1 所示。

实际测量中系统处于运行状态，网络中的电源和负荷均不为 0。因此可首先测量保留网络原有电源和负荷的情况下合环点两侧节点 a 和 b 的节点电压 U_{a0} 和 U_{b0} 。在初始系统的基础上，保证其他节点均无电流注入的情况下在合环点两侧节点 a 和 b 处分别注入幅值相同，方向相反(即相角相差 180°)的电流，并再次测量节点 a 和 b 的节点电压 U_{a1} 和 U_{b1} 。由叠加定理可得，通过前两次的测量值相减可得到将系统中负荷和上级网络电源全部置 0 时的无源网络中注入电流的测量情况，进而求解得到等值阻抗与循环电流。计算表达式如下所示。

$$\Delta U_a = U_{a1} - U_{a0} \tag{1}$$

$$\Delta U_b = U_{b1} - U_{b0} \tag{2}$$

$$Z = \frac{\Delta U_a - \Delta U_b}{I} \tag{3}$$

$$I_{\text{循环}} = \frac{U_{a0} - U_{b0}}{Z} \tag{4}$$

对本文所提基于叠加原理的电流注入法运用 Matlab/Simulink 进行仿真实验验证。仿真电路图如图 2 所示。

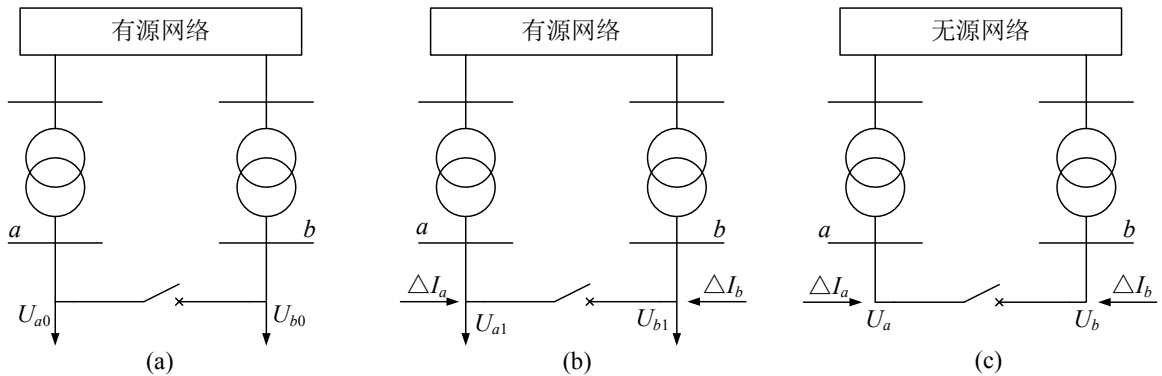


Figure 1. Equivalent circuit diagram of combined loop current calculation

图 1. 循环电流计算等值电路图

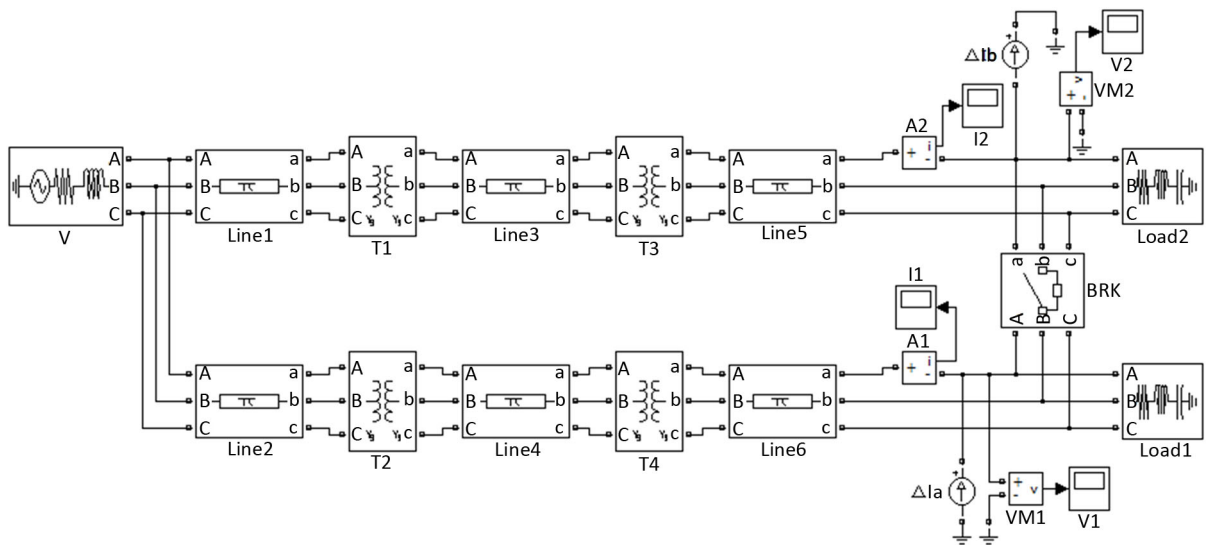


Figure 2. Simulation circuit diagram of circulating current calculation

图 2. 循环电流计算仿真电路图

对仿真所得电压电流数据进行幅频求解获得计算所需的电压电流相量,本次仿真实验中, $I_{\text{循环}}$ 的理论值为合环前后线路上电流的相量差, $I_{\text{循环}}$ 的计算值为采用本文所提基于叠加原理的电流注入法的计算结果。所需电压电流的测量结果如表 1 和表 2 所示。循环电流计算结果如表 3 所示。

通过上表数据可知, $I_{\text{循环}}$ 的计算值基本符合 $I_{\text{循环}}$ 的理论值,验证了本文所提的基于叠加原理的电流注入法计算合环循环电流的合理性。分析本次仿真的误差:一是仿真中电压数据是 10 kV 级别的,而软件仿真对节点电压数据只保留了 5 位有效数字,因此电压数据不够精确对本文的仿真结果造成了一定误差;三是本文在求取节点电压相量和馈线电流相量时是通过 Matlab 中的 fft 功能模块实现的,fft 函数对波形数据进行幅频和相频的计算求解存在一定误差。

3. 合环操作影响判据

研究合环操作对系统运行的影响一般是基于线路上的合环稳态电流进行分析的[8]。研究表明合环后线路稳态电流为线路初始负荷电流与循环电流的叠加[9]。因此可以通过循环电流大小来初步判断合环操作对系统运行造成的影响程度。

4. 提高合环转供电功率的应对措施

4.1. 负荷控制

为了减少合环操作引起的合环电流对电网系统造成的不利影响,控制系统中负荷是比较方便和有效的应对措施之一。系统中负荷主要包括母线负荷和线路负荷,一般对负荷的控制包括切除负荷以及基于

Table 1. Current phasor measurement values

表 1. 电流相量测量值

电流	算例 1	算例 2
$I_{a0}(\text{A})$	162.07 \angle -98.79°	57.13 \angle -104.47°
$I_{a1}(\text{A})$	329.15 \angle -173.19°	169.22 \angle -170.78°
$I_{b0}(\text{A})$	116.69 \angle -98.95°	107.6232 \angle -98.39°
$I_{b1}(\text{A})$	424.06 \angle -47.83°	192.48 \angle -44.62°

Table 2. Voltage phasor measurement values

表 2. 电压相量测量值

电压	算例 1	算例 2
$U_{a0}(\text{V})$	8889.9 \angle -93.59°	6176.9 \angle -93.16°
$U_{a1}(\text{V})$	8890.0 \angle -93.07°	6177.2 \angle -93.14°
$U_{b0}(\text{V})$	8502.0 \angle -91.35°	5903.3 \angle -92.68°
$U_{b1}(\text{V})$	8501.8 \angle -91.35°	5903.0 \angle -92.68°

Table 3. Calculated values of circulating currents

表 3. 循环电流计算值

参数	算例 1	算例 2
$I_{\text{循环理论值}}(\text{A})$	362.33	155.34
$I_{\text{循环计算值}}(\text{A})$	376.71	151.29
误差(%)	3.97	2.60

负荷情况进行操作等。对简化所得的系统合环等值电路图进行潮流分析和计算[10]。

图 3 用于分析合环过程中功率潮流变化情况, 图中 U_{AH2} , U_{BH2} 为合环开关闭合后变压器 T_1 和 T_2 的高压侧电压; S_{AH2} , S_{BH2} 为合环开关闭合后流入变压器 T_1 和 T_2 的功率; 变压器 T_1 和 T_2 的阻抗为 Z_{T1} , Z_{T2} ; S_{AL2} , S_{BL2} 为合环开关闭合后流出变压器 T_1 和 T_2 的功率; U_{AL2} , U_{BL2} 为合环开关闭合后变压器 T_1 和 T_2 的低压侧电压; S_A , S_B , S_C , S_D 分别为母线负荷和出线负荷; ΔS 为由节点 a 流向节点 b 的功率。在对该系统进行潮流计算时需要结合负荷转供作业形成环网所带来的相关参数边界条件[11]。则合环开关闭合后, 变压器 T_1 和 T_2 的高压侧母线电压如式(5)和式(6)所示。

$$U_{AH2} = U_{AL2} + \Delta U_{T2} = U_{AL2} + Z_{T1} \frac{S_{AL2}}{U_{AL2}} \tag{5}$$

$$U_{BH2} = U_{BL2} + \Delta U_{T2} = U_{BL2} + Z_{T2} \frac{S_{BL2}}{U_{BL2}} \tag{6}$$

考虑合环开关所在出线的阻抗很小可忽略不计, 则合环开关闭合后变压器 T_1 和 T_2 的低压侧母线电压差为 0, 即 $U_{AL2} = U_{BL2} = U_{L2}$, 因此合环开关闭合后, 变压器 T_1 和 T_2 的高压侧母线电压差 ΔU_{H2} 如下。

$$\Delta U_{H2} = \frac{S_{AL2}Z_{T1} - S_{BL2}Z_{T2}}{U_{L2}} \tag{7}$$

流入系统的总功率 S 以及由节点 a 流向节点 b 的功率 ΔS 以及循环电流的计算公式如下[12]。

$$S = S_{AL2} + S_{BL2} \tag{8}$$

$$\Delta S = S_{AL2} - S_A - S_C \tag{9}$$

$$\Delta S = S_{BL2} - S_B - S_D \tag{10}$$

$$I_c = \frac{\Delta S}{U_{L2}} \tag{11}$$

将式(8)、式(9)和式(10)代入式(7)中, 并结合式(11)可以求得合环操作引起的环网中循环电流如下。

$$I_c = \frac{(S_A + S_C)Z_{T1} - (S_B + S_D)Z_{T2} - \Delta U_{H2}U_{L2}}{(Z_{T1} + Z_{T2})U_{L2}} \tag{12}$$

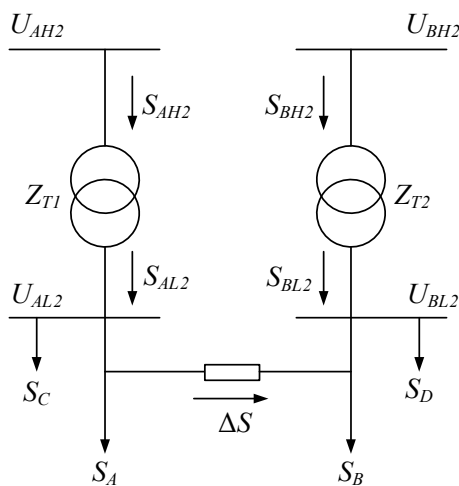


Figure 3. System closed-loop flow analysis diagram

图 3. 系统合环潮流分析图

目前现有文献所提减小合环电流的负荷控制方法基本是建立在切除负荷或者考虑在负荷低谷期进行合环的基础上。当合环点两侧负荷参数满足某些情况时, 切除负荷的控制方法是不能起到减小合环电流的作用, 甚至会使合环电流增大。另外, 考虑在负荷低谷期合环的方法, 即合环开关两侧所带负荷均减小, 通过式(12)可知, 当 S_A, S_B, S_C, S_D 均减小时, 可以使该式分母参数减少, 进而实现合环电流的减小。但该方法要求当地负荷低谷时刻接近合环点合环时刻, 所需条件较为苛刻。

考虑系统中变压器型号和参数已经固定, Z_{T1} 和 Z_{T2} 为固定值, 重点研究负荷参数。分析式(12)可知, 合环开关两侧所带负荷, 包括母线负荷以及馈线负荷的对称性越高, 即 $(S_A + S_C)$ 与 $(S_B + S_D)$ 越相近, 则合环操作后引起的合环电流越小, 实际操作中可先测得合环点两侧负荷功率大小, 通过适当的投切负荷提高合环点两侧负荷对称性。

4.2. 负变压器分接头调整

调整变压器分接头是调节合环电流比较有效也是最为常用的方法。当系统的运行方式和配网侧负荷确定以后, 影响合环过程中合环冲击电流以及合环稳态电流大小最主要的因素是合环开关两侧电压幅值差和相角差, 由于目前没有较好的电压相角差控制方法, 所以主要通过调整变压器分接头控制合环开关两侧电压幅值差, 进而减小合环电流以保证合环过程的安全成功性。

调整变压器分接头调节合环电流的基本原则是: 在合环操作前, 运用潮流计算或者测量系统获得合环点两侧 10 kV 低压母线的电压相量值, 将母线电压幅值较低的一侧变比调低或者将母线电压幅值较高的一侧变比调高, 使合环点两侧变压器低压侧母线上的电压幅值接近。假设合环操作前, 合环开关两侧电压相量分别为 $U_1 \angle \theta_1$ 和 $U_2 \angle \theta_2$, 考虑进行变压器分接头调整后, 合环开关两侧电压相量幅值发生变化而角度不变, 相角差为 $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$, 作出电压调整的相量图, 如图 4 所示。

U_1 和 U_2 为合环操作前合环开关两侧电压, 对 U_1 所属线路上的 110 kV/10.5 kV 变压器进行分接头调整, 即 U_1 可在其相量延长线上变化, U_2 保持不变。在对 U_1 进行电压幅值调整时, 影响合环电流大小的因素是电压相量差 ΔU , 因此应该以 U_2 在 U_1 相量上的投影 U_{1r} 为准进行调整, 此时合环点两侧电压差拥有最小值 ΔU_{\min} , 分接头调整公式如下所示。

$$k = \frac{U_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) - U_1}{U_1} \quad (13)$$

5. 仿真与分析

5.1. 负荷控制仿真

控制系统中负荷为单一变量并进行仿真可以分析负荷控制与循环电流大小的关系。本文仿真中负荷支路分布如图 5 所示。负荷 1 和负荷 2 为合环开关两侧出线所带负荷, 负荷 3 和负荷 4 为合环开关两侧母线所带负荷。出线负荷功率如表 4 所示。

本例中, 合环点左侧母线负荷与出线负荷之和为 $13 + j4.5 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 合环点右侧母线负荷与出线负荷之和为 $18 + j7.5 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。根据前文所述通过控制负荷减小循环电流原理可知, 合环点两侧负荷对称性越高, 合环过程引起的循环电流越小。为使本例中合环点两侧负荷趋于对称, 可以通过控制出线负荷 1 的有功功率提高, 出线负荷 1 的无功功率提高, 出线负荷 2 的有功功率降低, 出线负荷 2 的无功功率降低四种方式实现。利用 Matlab/Simulink 软件对负荷控制方式进行仿真, 分析负荷调整方法对合环转供电过程的影响以验证本文所提方法。负荷控制对循环电流影响的 Matlab/Simulink 仿真图如图 6 所示。

5.1.1. 负荷 1 有功功率控制

保持其他负荷节点负荷功率不变, 控制馈线负荷 1 的有功功率提高, 从 1 MW 提高到 2 MW, 每次

取样的仿真步长为 0.1 MW，记录负荷调整过程中冲击电流和循环电流的大小，如表 5 所示。馈线负荷 1 的有功功率提高与冲击电流和循环电流大小变化关系如图 7 所示。

5.1.2. 其他负荷功率控制

保持其他负荷节点负荷功率不变。分别控制馈线负荷 1 的无功功率从 0.5 MVar 提高到 1.5 Mvar；控制馈线负荷 2 的有功功率从 3 MW 降低到 2 MW；控制馈线负荷 2 的无功功率从 1.5 Mvar 降低到 0.5 Mvar。上述三种控制方法下负荷功率控制过程中冲击电流和循环电流变化关系如图 8 所示。

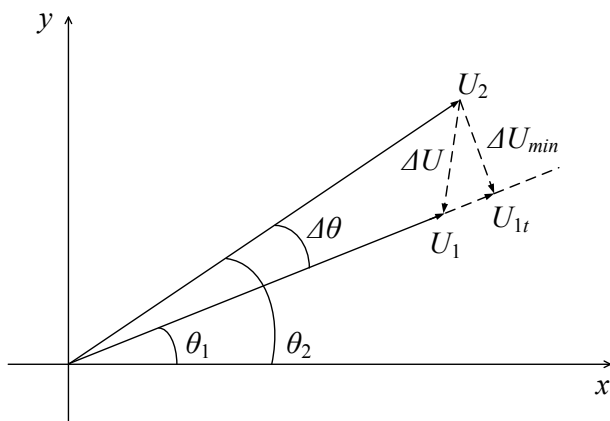


Figure 4. Voltage phasor diagram for transformer tap adjustment
图 4. 变压器分接头调整的电压相量图

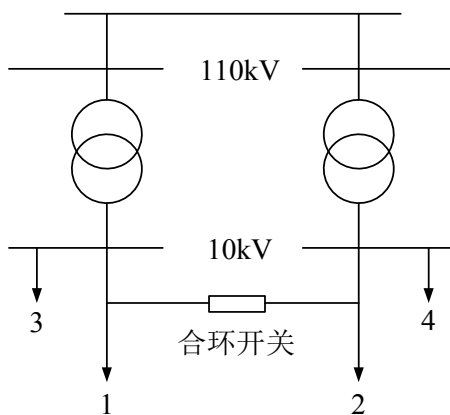


Figure 5. Load control simulation simplified diagram
图 5. 负荷控制仿真简化图

Table 4. Load of bypass
表 4. 出线所带负荷

负荷支路	负荷功率(MV·A)	同侧负荷总和(MV·A)
出线负荷 1	1.0 + j0.5	13.0 + j4.5
母线负荷 3	12.0 + j4.0	
出线负荷 2	3.0 + j1.5	18.0 + j7.5
母线负荷 4	15.0 + j6.0	

5.1.3. 仿真步长为 1 MW 下的功率控制

根据上述仿真结果可知：通过控制馈线负荷 1 的有功功率提高，馈线负荷 1 的无功功率提高，馈线负荷 2 的有功功率降低，馈线负荷 2 的无功功率降低四种方法使合环点两侧负荷趋于对称，能有效降低合环操作过程中的循环电流，验证了本文所提通过提高合环点两侧负荷对称性的负荷控制方法的合理性。考虑增加仿真步长，以负荷 1 的功率控制为例，功率调节步长提高至 1 MW 和 1 MVar，记录负荷调整过程中冲击电流和循环电流的大小。负荷 1 的功率提高与冲击电流和循环电流大小变化关系如图 9 所示。

Table 5. Load 1 circulating current in active power control process
表 5. 馈线负荷 1 有功功率控制过程中的冲击电流和循环电流

馈线负荷 1 有功功率(MW)	冲击电流最大瞬时值(A)	循环电流(A)
1.0	506.9262	347.7250
1.1	503.6789	344.5431
1.2	500.4289	341.3696
1.3	497.1771	338.2046
1.4	493.9216	335.0484
1.5	490.6641	331.9012
1.6	487.4037	328.7633
1.7	484.1562	325.6350
1.8	480.9582	322.5165
1.9	477.7586	319.4081
2.0	474.5553	316.3100

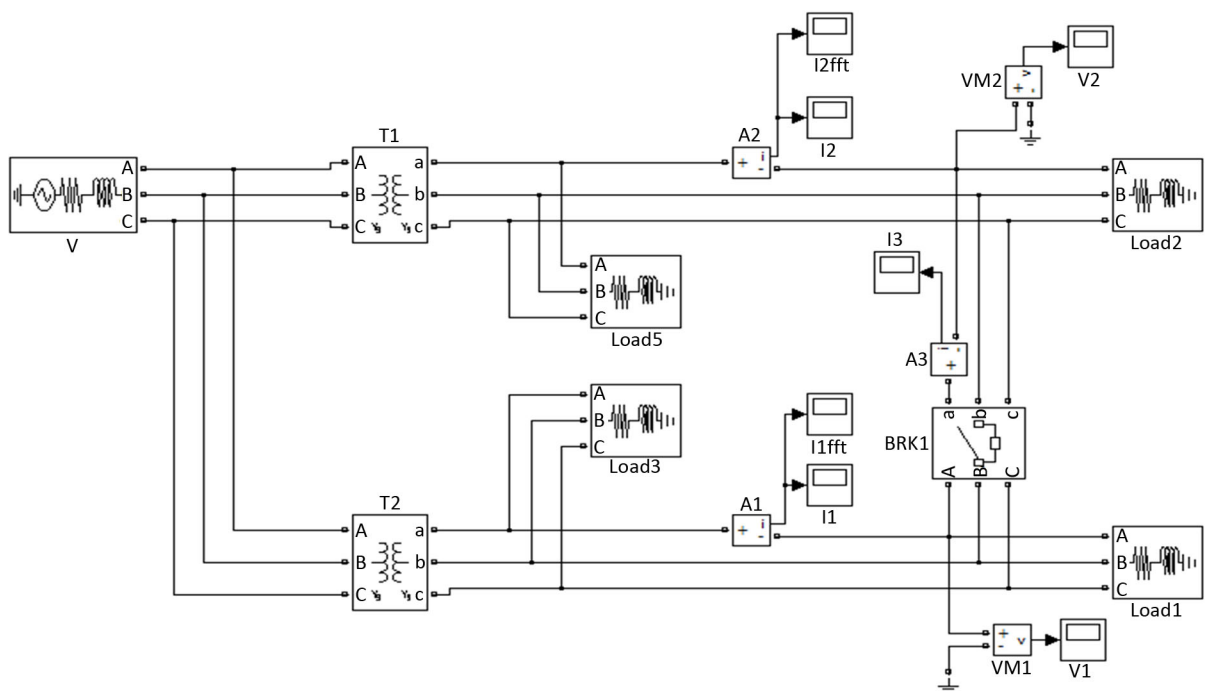


Figure 6. Load control simulation circuit diagram
图 6. 负荷控制仿真电路图

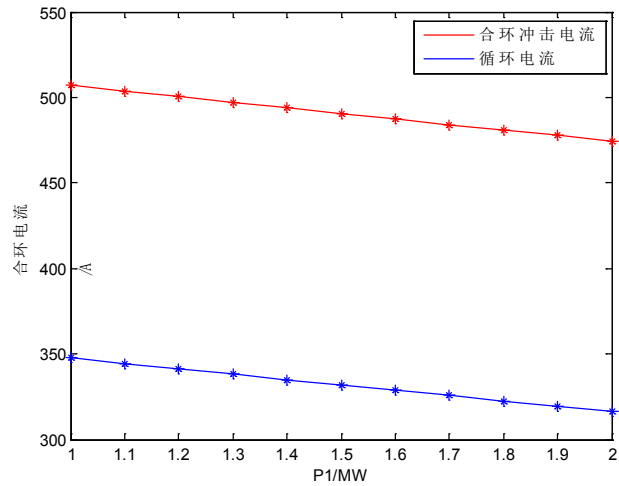


Figure 7. Load 1 active power control
图 7. 负荷 1 有功功率控制

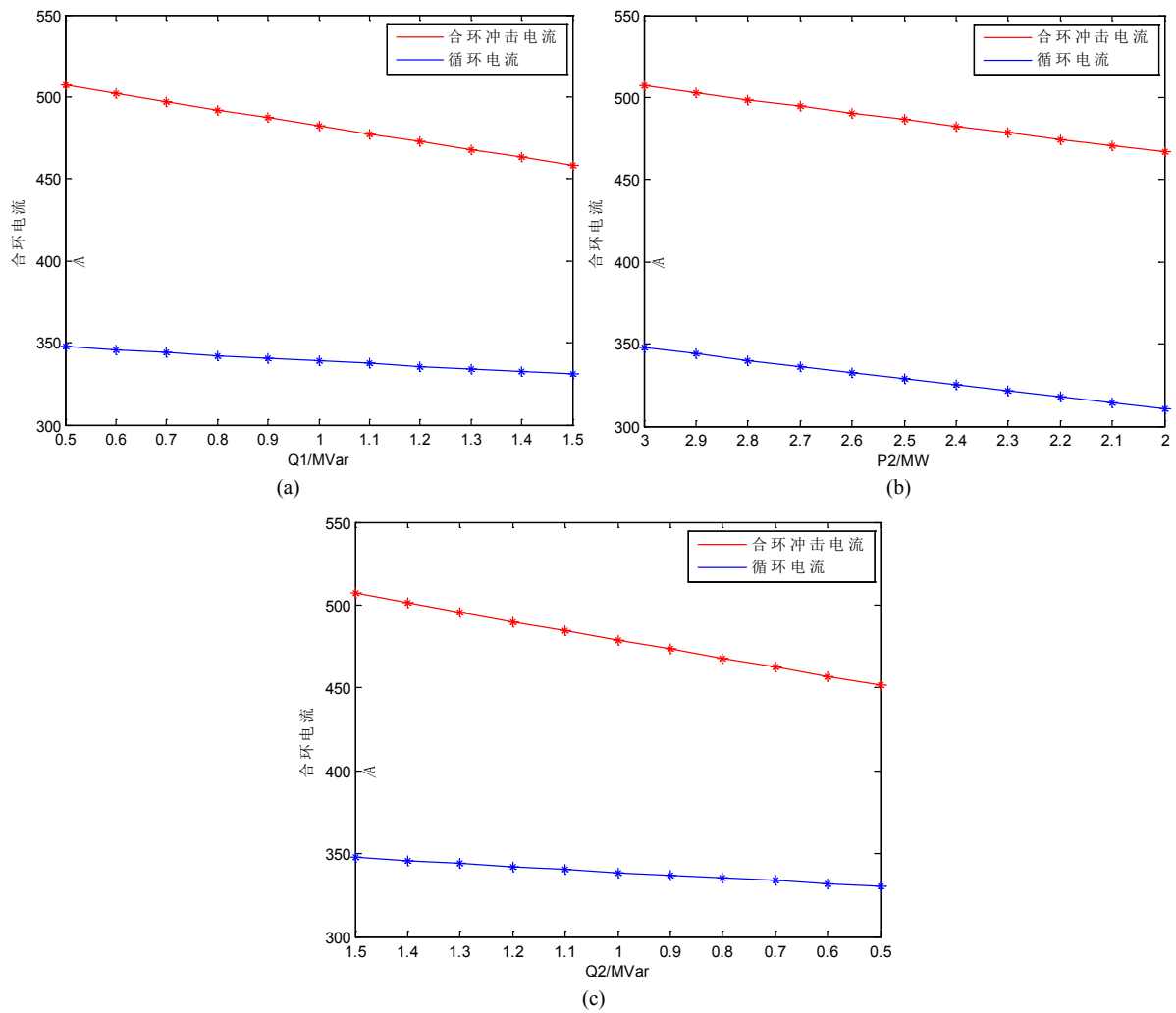


Figure 8. Other load power control; (a) Load 1 reactive power control; (b) Load 2 active power control; (c) Load 2 reactive power control

图 8. 其他负荷功率控制; (a) 负荷 1 无功控制; (b) 负荷 2 有功控制; (c) 负荷 2 无功控制

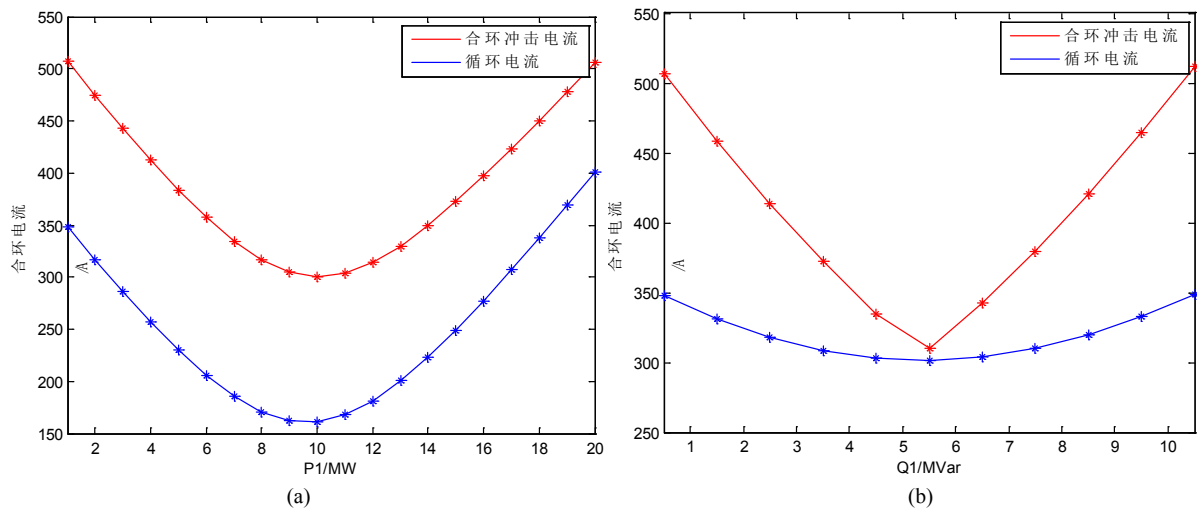


Figure 9. Load 1 power control (a) Load 1 active power control; (b) Load 1 reactive power control
图 9. 负荷 1 功率控制(a)负荷 1 有功控制; (b)负荷 1 无功控制

由仿真结果分析可知,当馈线负荷 1 有功功率调整至 10 MW 时,合环后线路上冲击电流最大瞬时值与稳态循环电流值达到最小。当馈线负荷 1 有功功率继续上调时,循环电流增大。符合本文所提的提高合环点两侧负荷对称性的负荷控制方法。但考虑实际操作中负荷投切量的大小不可能达到 1 MW 等级[13],因此 0.1 MW 和 0.1 Mvar 仿真步长下的数据更符合实际操作,对实际运行更具指导意义。在实际运行中,进行负荷转供作业的两条 10 kV 出线会形成一个总负荷[14]。以图 4 为例,该总负荷即等于 S1 + S2 + S3 + S4,如果这个总负荷超过一个定值范围则会导致合环环流增大从而造成线路过载。所以,在负荷转供作业准备过程中需要注意对两条线路总负荷的核算和调整,将其控制在合理范围内。另外,通过增加负荷以达到提高对称性的方式虽然能降低循环电流,但出线上的初始负荷电流也会增加[15]。因此一般尽量选择减负荷以达到提高合环点两侧系统负荷对称性的方式或者不建议在本地负荷高峰期进行合环操作。

5.2. 变压器分接头调整仿真

在仿真中,由于合环点两侧电压可直接通过电压测量元件测得,不需要通过复杂的潮流计算求解,因此可以直观的研究变压器分接头调整方法对降低合环电流的影响。本次仿真中,系统初始状态下变压器分接头参数采用表 6 所示的初始变比进行合环操作仿真,获得初始变比下合环电流数据。然后调整变压器分接头,即改变变压器变比,再重新进行合环操作仿真,并记录此时合环电流数据,将分接头调整过程的合环电流数据进行对比和分析,并将数据记录于表 7 中。分接头调整过程合环冲击电流大小和循环电流大小分别如图 10 所示。

变压器分接头设置为初始变比 110kV/10.5 kV 时,合环操作前合环开关两侧馈线电压 U_1 和 U_2 分别为 $8.7452 \angle -92.77^\circ$ 和 $8.6281 \angle -93.99^\circ$,代入式(13)中可求得分接头要选取 111.375 kV/10.5 kV。在该变比下,电路中的合环冲击电流和循环电流最小,验证了通过调整变压器分接头减小合环电流方法的合理性。

6. 结论

- 1) 本文所提基于叠加原理的电流注入法测量系统等效阻抗,进而计算合环操作引起的循环电流具有实时性和直观性的优点。
- 2) 通过采用提高合环点两侧负荷对称性的负荷控制策略,特别是以减负荷达到提高对称性的方式,能有效降低合环操作引起的循环电流大小,进而降低合环操作的风险,提高作业过程中系统运行的安全

Table 6. Transformer tap changer parameters
表 6. 变压器分接头参数

变压器	分接头	初始变比
T1	110 kV \pm 5 \times 1.25%/10.5 kV	110 kV/10.5 kV
T2	110 kV \pm 5 \times 1.25%/10.5 kV	110 kV/10.5 kV

Table 7. Loop current in the tapping process
表 7. 分接头调整过程合环电流大小

分接头选取	冲击电流最大瞬时值(A)	循环电流(A)
105.875 kV/10.5 kV	1416.9248	781.8016
107.25 kV/10.5 kV	1088.5975	615.5517
108.625 kV/10.5 kV	780.7096	435.9578
110 kV/10.5 kV	506.9296	347.7250
111.375 kV/10.5 kV	296.9818	292.7166
112.75 kV/10.5 kV	465.0234	327.7166
114.125 kV/10.5 kV	704.4718	425.7097
115.5 kV/10.5 kV	969.1560	551.5813
116.875 kV/10.5 kV	1240.9543	687.5080

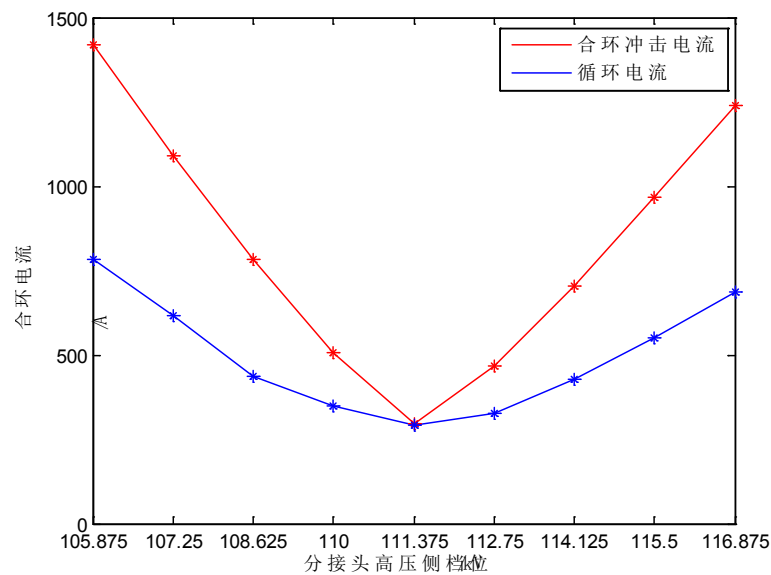


Figure 10. Load 1 active power control
图 10. 分接头调整过程合环电流大小

稳定性。

3) 通过合理调整变压器分接头，控制合环开关两侧电压幅值差，能有效减小合环电流，提高合环成功率。

4) 本文对合环操作中降低循环电流的研究中提出了合理的负荷控制策略，实际工程中可以通过投切电容器或电抗器等措施实现，今后应对这些具体的负荷控制措施的实施过程及其对系统安全稳定的影响

做深入研究。另外在变压器分接头调整的研究中可知合环点两侧电压相角差也是影响循环电流的重要因素之一,目前国内没有较好的解决办法,因此今后应该重点研究降低合环点两侧电压相角差的有效措施。

参考文献

- [1] 叶凌. 利用综合不停电作业法进行负荷转供的研究[C]//决策论坛——政用产学研一体化协同发展学术研讨会论文集(下). 2015.
- [2] 潘浩辉. 惠州 10 kV 配网合环转电对继电保护的影响研究[D]. 华北电力大学(北京), 2011.
- [3] 刘健, 孙泉, 张小庆, 等. 配电网合环分析与合环条件判断[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 130-135.
- [4] Cheng, T. and Cheng, L.S. (2001) Study on Electromagnetic Loop Network Operation of Power Systems. *Central China Electric Power*.
- [5] 席云华. 广州地区 10 kV 电网合环供电理论研究[J]. 科学技术创新, 2013(26): 18-20.
- [6] Zou, J.X., Zhou, G.B., Ke, F.U., et al. (2010) Electromagnetic Loop Closing Calculation Model and Experimental Analysis on 10 kV Distribution Network. *Power System Protection & Control*.
- [7] 刘洋. 10 kV 配网合环电流计算方法研究[J]. 供用电, 2016, 33(4): 54-58.
- [8] 谭明甜. 低压配电网环网系统设计、实现及可靠性分析[D]. 华北电力大学(北京), 2016.
- [9] 郭添根. 浅析城市配电网存在问题及规划改造思路[J]. 军民两用技术与产品, 2014(17).
- [10] 李旭前, 石连生, 吕泽阳, 等. 10 kV 配电网合环倒负荷研究[J]. 云南电力技术, 2014, 42(2): 41-44.
- [11] 赵国庆, 朱华锋. 关于 10 kV 城市配电网建设与电气设计[J]. 建材发展导向, 2010(2S): 105-106.
- [12] 鄢溢生. 10 kV 配电网合环转供电操作的可行性分析及实际应用[J]. 中国新技术新产品, 2013(20): 159-160.
- [13] 王海燕, 曾江, 刘刚. 国外配网自动化建设模式对我国配网建设的启示[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 125-129.
- [14] 杨鹏伟. 配电网合环分析计算与应用研究[D]. 华北电力大学(北京), 2016.
- [15] Thongkrajay, U. and Kulworawanichpong, T. (2008) Convergence Improvement of Gauss-Seidel Power Flow Solution Using Load Transfer Technique. *Iasted International Conference on Modelling, Identification and Control*, ACTA Press, 1-6.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-1565, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: tdet@hanspub.org