

基于优先级的配电网合环综合辅助决策算法

吴艳娟¹, 王皓月¹, 杨理²

(1. 天津理工大学天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室, 天津 300384;

2. 国网重庆市电力公司永川供电分公司, 重庆 402160)

摘要: 针对配电网合环的操作指导问题, 提出一种基于优先级的配电网合环综合辅助决策算法。首先, 确定所有措施要考虑的指标, 并对这些指标进行重要性排序并给出量化值。其次, 对每个措施在各个指标下的标度值进行评判, 并计算各个措施的优先值, 确定措施优先级。最后, 根据优先级和制定的目标确定每个措施的具体调节方案, 从而获得合环综合辅助决策。该算法可根据配电网实际情况对指标和调节方案进行调整, 得到合环的具体调节方案以及决策判断。在所开发的配电网合环仿真运行平台上通过编程实现算法, 并以某城市实际配电网验证了算法的可行性。

关键词: 优先级; 配电网; 合环操作; 综合辅助决策; 仿真平台

A hybrid aided decision-making algorithm of distribution network loop closing based on priority

WU Yanjuan¹, WANG Haoyue¹, YANG Li²

(1. Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated Systems, Tianjin University of

Technology, Tianjin 300384, China; 2. Yongchuan Power Supply Branch, State Grid

Chongqing Electric Power Company, Chongqing 402160, China)

Abstract: To solve the operation guidance problem of distribution network loop closing, a hybrid aided decision-making algorithm of distribution network loop closing based on priority is proposed. First, the indices to be considered for all measures are determined, and these indices are sorted and quantified by importance. Secondly, the scale values of each measure under each index are judged, and the priority value of each measure is calculated to determine the priority of these measures. Finally, the specific adjustment plan of each measure is determined according to the priority and the formulated target, and then hybrid aided decision-making of loop closing is obtained. This algorithm can adjust the indices and the adjustment plan according to the actual situation of the distribution network, such that the specific adjustment plan and decision-making judgment of the loop closing can be obtained. The algorithm is implemented by programming on the developed distribution network loop closing simulation running platform, and the feasibility of the method is tested and verified on a city distribution network.

This work is supported by Tianjin Science and Technology Program (No. 18ZXYENC00100) and Science and Technology Project of State Grid Chongqing Electric Power Company (No. SGTYHT/17-JS-199).

Key words: priority; distribution network; loop closing operation; hybrid aided decision-making; simulation platform

0 引言

在国内, 随着国民经济水平的提高, 各种生产设备和生活电器对供电电源的可靠性要求越来越高, 电网在实际运行中采用不间断电源合环倒闸操

作的情况越来越广泛。国外由于配电网接线运行方式以及保护配置与国内有差异, 本身为环网运行或配有一套成熟的合环保护系统, 对双端供电网络合环操作的研究很少。目前, 我国针对配电网合环大多依靠经验操作^[1-3], 会因合环瞬间冲击电流过大导致合环不成功。因此, 针对配电网合环辅助决策研究很有必要。文献[4]针对 10 kV 配电网合环操作进行了研究, 文献[5]进行了配电网合环分析与合环条

件判断,文献[6]对计及不确定性的配电网合环点安全性与经济性进行评估,文献[7]提出了考虑合环约束的配电网重构方法,文献[8]进行了基于惩罚性变权最优综合评价模型的电磁环网解合环方案分析,文献[9]进行了基于移动互联网的配电网在线合环计算软件设计方案,文献[10]进行了基于概率潮流的10 kV配电网合环操作安全性评估。这些文献都是对合环操作的研究,但只是对合环条件、方案 and 安全性进行了分析研究,没有提出一套完整的合环辅助决策。

文献[11]研究了复杂配电网合环电流调控的实用化策略,分别对电容器补偿和网络重构两种措施进行了调控分析;文献[12-13]进行配电网合环分析与调控措施研究,分别对调节变压器分接头和无功补偿器进行了调控分析;文献[14]针对桂林城区配电网合环转负荷分析与对策进行研究,分别对合环方式、调节变压器分接头和负荷重分配进行了合环调控分析。这些研究都是针对单个措施对系统影响的分析。文献[15]进行了配电网合环运行电流分析与控制策略研究,对负荷重分配、投切电容器、调节变压器分接头和限流电抗器四种调节措施进行了分析实验,但只分析了各种调节效果,没有提出完整的调节方法。基于优先级的电网调度和电网控制方法研究已经取得了进展^[16-19]。

鉴于上述,本文提出基于优先级的配电网合环综合辅助决策算法,首先根据合环操作所考虑的指标确定多个措施的优先级排序,然后确定各个措施调节方案,最后形成综合辅助决策。为配电网合环提供一套完整的指导方案,实现多个措施按优先级顺序协同对系统进行调节,从而达到合环操作要求。

1 合环综合辅助决策算法介绍

在配电网合环综合辅助决策算法研究中,因有多个措施共同对系统进行调节,措施调节顺序不一样,对系统运行、调节效果、调节可操作性等都会有影响。并且对于 m 个调节措施,措施调节顺序排列就有 $m!$ 个,如果采用穷举法,针对每种调节顺序都进行配电网多个因素的调节分析,不但工作量会非常大,而且在考虑多个因素调节时,各个因素的权重分配也不易确定。

因此提出了基于优先级的配电网合环综合辅助决策,首先根据配电网的系统运行特性进行措施优先级的确定,措施优先级确定后即确定措施的调节顺序,然后在该调节顺序下得到合环综合辅助决策的具体调节方案。所提算法整体分为三个层次:第一层为指标层,第二层为措施优先级层,第三层为

措施调节方案层。所提出的合环综合辅助决策算法层次图如图1所示。

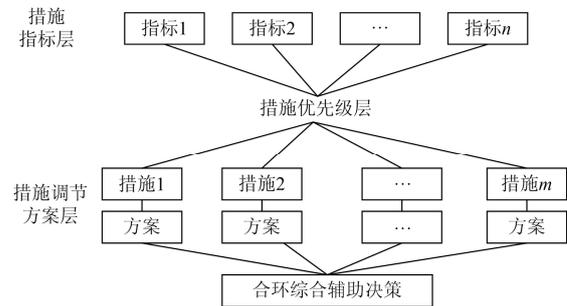


图1 合环综合辅助决策算法层次图

Fig. 1 Hierarchy diagram of loop closing hybrid aided decision-making algorithm

第一层措施指标层,需要对 n 个指标进行重要性排序并对指标重要性赋值,为下一层措施优先级层的量化做准备。

第二层措施优先级层,需要对 m 个措施在每个指标下进行标度值评判,通过第一层确定的指标重要性以及本层确定的措施标度值对措施优先级进行量化,从而得到措施的优先级排序。

第三层措施调节方案层,根据调节目标物理量对每个措施的具体调节方案进行确定,得到合环综合辅助决策。

1.1 多措施优先级的确定

提出的配电网合环综合辅助决策是由多个措施共同进行合环调控,因此需要对多个措施进行优先级的确定,而优先级需要在一定的指标下进行确定。确定多措施优先级的层次关系图如图2所示。

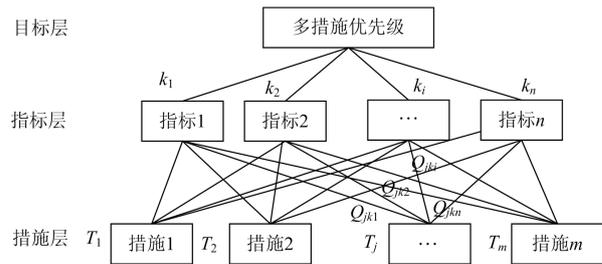


图2 确定多措施优先级的层次关系图

Fig. 2 Hierarchical relationship diagram for multiple measures priority determination

图2中, $k_i (i=1,2,\dots,n)$ 表示第 i 个指标根据重要性所赋的值,重要性由低到高进行排序,赋值依据自然数顺序由1开始对指标进行重要性赋值。

$Q_{ijk} (j=1,2,\dots,m)$ 表示第 j 个措施在第 i 个指标下所得标度值,反应各个措施对该指标的影响程度。

记第 j 个措施在第 i 个指标下的物理量值为 \hat{Q}_{jk_i} , 在第 i 个指标下所有措施物理量值中最大值作为基准值, 记为 $\hat{Q}_{k_{\max}}$, 将物理量值进行标么化即为标度值, 如式(1)所示。

$$Q_{jk_i} = \frac{\hat{Q}_{jk_i}}{\hat{Q}_{k_{\max}}} \quad (1)$$

$T_j (j=1, 2, \dots, m)$ 表示第 j 个措施的优先值, 计算公式为

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{1k_1} & Q_{1k_2} & \cdots & Q_{1k_n} \\ Q_{2k_1} & Q_{2k_2} & \cdots & Q_{2k_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Q_{mk_1} & Q_{mk_2} & \cdots & Q_{mk_n} \end{bmatrix}_{m \times n} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \vdots \\ k_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.2 合环综合辅助决策

1) 潮流计算^[20-22]

系统合环前等效网络为辐射形配电网, 应用前推回代潮流计算得到系统合环前各处节点的电压幅值和相角, 分别记为 U_q 、 θ_q 。系统合环后等效网络为环形网, 应用牛顿-拉夫逊潮流计算得到系统合环后各处节点的电压幅值和相角, 分别记为 U_h 、 θ_h 。

2) 调节目标物理量

由于合环处电压差以及合环两侧负荷不平衡, 在进行合环操作时会引起系统目标物理量越限, 因此需要针对目标物理量确定措施调节方案, 将目标物理量的限值约束条件组成一个集合, 如式(3)所示。

$$\mathbf{F} = \{f_1[f_{1\min}, f_{1\max}] \quad f_2[f_{2\min}, f_{2\max}] \cdots f_k[f_{k\min}, f_{k\max}] \cdots\} \quad (3)$$

式中, $f_k[f_{k\min}, f_{k\max}]$ 代表第 k 个目标物理量的上下限。

3) 调节措施

在第 1.1 节中已经对多个措施进行优先级确定, 假设 m 个措施优先级顺序由高到低依次为: 措施 1 → 措施 2 → … → 措施 m 。各个措施调节前的量分别记为 x_1, x_2, \dots, x_m , 对应的调节变化量分别记为 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_m$, 则措施对目标物理量的调节如式(4)所示。

$$\begin{cases} f_1(x_1 + \Delta x_1 \quad x_2 + \Delta x_2 \quad \cdots \quad x_j + \Delta x_j) \in [f_{1\min}, f_{1\max}] \\ f_2(x_1 + \Delta x_1 \quad x_2 + \Delta x_2 \quad \cdots \quad x_j + \Delta x_j) \in [f_{2\min}, f_{2\max}] \\ \vdots \\ f_k(x_1 + \Delta x_1 \quad x_2 + \Delta x_2 \quad \cdots \quad x_j + \Delta x_j) \in [f_{k\min}, f_{k\max}] \\ \vdots \end{cases} \quad (4)$$

$f_k(x_1 + \Delta x_1 \quad x_2 + \Delta x_2 \quad \cdots \quad x_j + \Delta x_j)$ 表示按照优先级由高到低, 即对应的措施调节量从 $x_1 + \Delta x_1$ 到 $x_j + \Delta x_j$ 进行 j 个措施调节后, 第 k 个目标物理量值, 其中 j 满足 $j \leq m$ 。

依据调节目标物理量对 m 个措施分别进行具体调节方案的确定, 其对应的调节方案分别为: 方案 1 → 方案 2 → … → 方案 m 。合环综合辅助决策算法流程如图 3 所示。

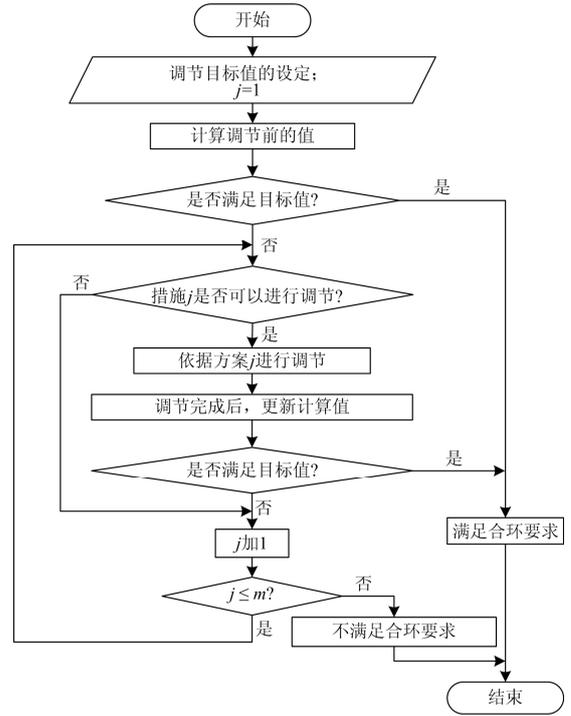


图 3 合环综合辅助决策算法流程图

Fig. 3 Flow chart of loop closing hybrid aided decision-making algorithm

根据多个措施确定的优先级, 从优先级高的措施到优先级低的措施按照确定的调节方案依次进行调整, 每调节一次都需要进行潮流计算得到目标物理量值。当调节后所有目标物理量值都满足设定的目标值(即在集合 \mathbf{F} 中), 则调节结束; 或当全部措施调节完成后(即优先级最低的措施调节完成后), 调节结束。

2 合环综合辅助决策算法应用

2.1 指标的设计

本文配电网合环考虑的指标包括四方面, 分别为系统可靠性、系统稳定性、措施可操作性和措施经济性, 即图 1 中 $n=4$ 。可以根据具体电力网络特点以及实际系统要求对配电网合环考虑的指标进行确定, 对本次考虑的四个指标进行分析以及重要性

排序如下。

(1) 配电网合环操作主要为了实现在进行事故处理、线路检修、负荷转移等情况下尽量保证更少的线路不停电转线运行,来提高供电系统的可靠性,因此首先考虑合环措施的指标为系统可靠性。

(2) 合环操作完成后需要保证系统的稳定运行,否则合环操作也是不成功的,对于合环操作,如若满足不了系统稳定性,会进行合环点重新选择或放弃合环操作,因此第二考虑合环措施的指标为系统稳定性。

(3) 为了保证合环决策的实用性,应该保证提出的决策方案更易操作实现,因此第三考虑合环措施的指标为措施可操作性。

(4) 对于配电网合环操作还应考虑各个措施实现所需的投资,以及进行该措施调节后系统运行的效率,因此第四考虑合环措施的指标为措施经济性。

将四个指标根据本文研究内容进行重要性排序,其重要性由低到高依次为:措施经济性→措施可操作性→系统稳定性→系统可靠性。记系统可靠性为指标 1,指标 1 赋值为 4,即 $k_1=4$;记系统稳定性为指标 2,指标 2 赋值为 3,即 $k_2=3$;记措施可操作性为指标 3,设定指标 3 赋值为 2,即 $k_3=2$;记措施经济性为指标 4,设定指标 4 赋值为 1,即 $k_4=1$ 。

2.2 优先级的确定

配电网合环措施主要通过调节合环处两端电压使得合环瞬间冲击电流减小,本次配电网合环辅助决策中采用四种常用的调节措施,分别为调节变压器分接头、投切电容器、限流电抗器和负荷重分配,分别记为措施 1、措施 2、措施 3 和措施 4,即图 1 中 $m=4$ 。可以根据具体电力网络和实际系统的调节条件进行措施确定。

对多措施进行优先级确定前,需要对各个措施在每种指标下进行量值标度。

(1) 系统可靠性。反映该指标的物理量设为各个措施分别对配电网进行调节后负荷有功功率的变化量,若配电网共有 N 个负荷,则标度计算如式(5)所示。

$$\Delta P_M = \sum_{r=1}^N |P_{M_q r} - P_{M_h r}| \quad (5)$$

式中: ΔP_M 为配电网有功负荷总的变化量; $P_{M_q r}$ 为措施调节前第 r 个负荷有功功率; $P_{M_h r}$ 为措施调节后第 r 个负荷有功功率。

四个措施分别对配电网系统进行一个步长的调节,得到有功负荷总的变化量,4 个值中取最大值作为基准值,根据式(1)求得 4 个物理量值的标幺值

即为标度值,分别为 Q_{1k_1} 、 Q_{2k_1} 、 Q_{3k_1} 、 Q_{4k_1} 。所得的标度值越大,说明该措施进行调试后对系统的可靠性影响越大。

(2) 系统稳定性。反映该指标的物理量设为各个措施分别对配电网进行调节后合环回路中各支路稳态电流有效值的变化量,配电网合环回路中包含 L 条支路,则标度值计算如式(6)所示。

$$\Delta I_w = \sum_{t=1}^L |I_{w_q t} - I_{w_h t}| \quad (6)$$

式中: ΔI_w 为配电网合环回路所有支路稳态电流有效值的变化量; $I_{w_q t}$ 为措施调节前第 t 条支路稳态电流有效值; $I_{w_h t}$ 为措施调节后第 t 条支路稳态电流有效值。

四个措施分别对配电网系统进行一个步长的调节,得到所有支路稳态电流有效值的变化量,4 个值中取最大值作为基准值,根据式(1)求得 4 个物理量值的标幺值即为标度值,分别为 Q_{1k_2} 、 Q_{2k_2} 、 Q_{3k_2} 、 Q_{4k_2} 。所得的标度值越大,说明该措施对系统的稳定性影响越大。

(3) 措施可操作性。反映该指标的物理量为针对具体配电网系统该措施的可操作性判定,主要是考虑措施调节时需不需要进行断电操作。若需要进行断电操作则该措施在此指标下标度值为 1,否则标度值为 0。

四个措施得到的标度值分别为 Q_{1k_3} 、 Q_{2k_3} 、 Q_{3k_3} 、 Q_{4k_3} 。所得的标度值为 1(即大值)时,说明该措施可操作性较差。

(4) 措施经济性。反映该指标的物理量设为各个措施分别对配电网进行调节后系统有功损耗的量,则标度值计算如式(7)所示。

$$\Delta P_s = P_h - P_q \quad (7)$$

式中: ΔP_s 为措施调节后配电网系统有功损耗量; P_h 为措施调节后系统总的有功功率损耗; P_q 为措施调节前系统总的有功功率损耗。

四个措施分别对配电网系统进行一个步长的调节,得到调节前后有功损耗量,4 个值中取最大值作为基准值,根据式(1)求得 4 个物理量值的标幺值即为标度值,分别为 Q_{1k_4} 、 Q_{2k_4} 、 Q_{3k_4} 、 Q_{4k_4} 。所得的标度值越大,说明该措施调节后系统损耗越大,即经济性越差。

根据式(2)进行措施优先值的计算,将确定的指标重要性量值和措施在各个指标下的标度值代入式(2)得到式(8)。

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{1k_1} & Q_{1k_2} & Q_{1k_3} & Q_{1k_4} \\ Q_{2k_1} & Q_{2k_2} & Q_{2k_3} & Q_{2k_4} \\ Q_{3k_1} & Q_{3k_2} & Q_{3k_3} & Q_{3k_4} \\ Q_{4k_1} & Q_{4k_2} & Q_{4k_3} & Q_{4k_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

计算可得四个措施优先值分别为 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 。所得优先值越大, 则代表该措施对系统四个指标影响越大, 越不利于优先进行该措施调节, 因此根据优先值由小到大的排序即为优先级由高到低的顺序, 最终根据考虑指标的重要性以及在该指标下各个措施所得到的标度值获得四个措施的优先值, 完成措施优先级的排序。

2.3 措施的调节方案

进行合环操作时, 因合环处两侧存在电压差, 从而导致合环瞬间冲击电流过大导致合环不成功, 甚至引起系统不稳定。因此, 以合环处冲击电流作为措施的调节目标, 合环冲击电流最大值为调节的目标物理量, 即式(3)表示的集合 F 只包含一个目标物理量, 此时集合 F 如式(9)所示。

$$F = \{I[I_{\min}, I_{\max}]\} \quad (9)$$

式中: I 为合环处冲击电流最大值; I_{\min} 、 I_{\max} 分别为合环处冲击电流最大值的下限和上限。

在进行合环综合辅助决策前, 根据系统实际情况, 将每种措施调节范围进行上下限设定, 使得每种措施调节都在满足系统稳定性的条件下进行合环冲击电流的调节。对于冲击电流来说下限没有限制意义, 只需满足上限即可。

合环后支路冲击电流全响应公式为

$$i_k(t) = i_h(\infty) + [i(0_+) - i_h(\infty)]_{t=0} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (10)$$

式中: τ 为暂态过程的时间常数, 对于感性电路, $\tau = \frac{L}{R}$, 即为 $\tau = \frac{X_{\Sigma}/\omega}{R_{\Sigma}}$; $i_h(\infty)$ 为合环后电路达到稳态的支路电流时域函数, 即通过合环后潮流计算得到的支路两侧节点电压向量差 $\Delta U_h \sin(\omega t + \theta_h)$ 与合环后支路总阻抗 Z_{Σ_h} 之比, 即 $i_h(\infty) = \Delta U_h \sin(\omega t + \theta_h) / Z_{\Sigma_h} = I_h \sin(\omega t + \varphi_h)$; $i_h(\infty)|_{t=0}$ 为合环后电路达到稳态的支路电流初始值, 即为 $i_h(\infty)|_{t=0} = I_h \sin(\varphi_h)$; $i(0_+)$ 为合环瞬间支路电流初始值, 依据感性电路换路定理 $i(0_+) = i(0_-)$, $i(0_+)$ 等于合环前该支路的电流 $i(0_-)$, 当该支路是合环处支路时, 由于合环前合环处支路处于断开状态, 因此 $i(0_+) = 0$ 。而当该支路为非合环支路时, 通过合环前潮流计算得到的支路两侧节点电压向量差 $\Delta U_q \sin(\omega t + \theta_q)$ 与合环前支路总阻抗 Z_{Σ_q} 之比得到

该支路合环前稳态电流的时域函数, 然后将 $t=0$ 代入该时域函数后即获得该非合环支路的初始电流 $i_L(0_+)$, 如式(11)所示。

$$i_L(0_+) = i_L(0_-) = i_q(t)|_{t=0} = \left[\frac{\Delta U_q \sin(\omega t + \theta_q)}{Z_{\Sigma_q}} \right]_{t=0} = I_q \sin(\varphi_q) \quad (11)$$

$i_h(\infty)|_{t=0}$ 为合环后, 合环支路达到稳态电流时的初始值, 即为 $i_h(\infty)|_{t=0} = I_h \sin(\varphi_h)$ 。

τ 为暂态过程的时间常数, 对于感性电路, $\tau = \frac{L}{R}$, 即为 $\tau = \frac{X_{\Sigma}/\omega}{R_{\Sigma}}$ 。

由此可得, 合环处支路冲击电流为

$$i_k(t) = I_h \sin(\omega t + \varphi_h) - I_h \sin(\varphi_h) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (12)$$

环路中非合环支路冲击电流为

$$i_L(t) = I_h \sin(\omega t + \varphi_h) + [I_q \sin(\varphi_q) - I_h \sin(\varphi_h)] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (13)$$

通过式(12)和式(13)可求得合环处冲击电流最大值和合环回路中各支路冲击电流最大值, 为了减小合环处冲击电流最大值, 可通过减小合环处两侧电压差或增大合环回路总阻抗, 以此目标物理量来确定措施的调节方案。

(1) 变压器分接头的调节方案。通过拓扑搜索得到距离合环处两侧最近的变压器支路, 先对合环处两端中电压高的一侧所属变压器进行调节, 调节方法是将变压器变比增大, 即分接头向正调压百分比进行调节。若电压高的一侧变压器调节到上限仍不满足合环条件或再继续上调效果反而变差, 则对电压低的一侧变压器进行调节, 调节方法是将变压器变比减小, 即分接头向负调压百分比进行调节, 直到满足合环条件或调节到下限, 又或者再继续下调效果反而变差, 则结束变压器分接头的调节。

(2) 投切电容器的调节方案。通过拓扑搜索得到合环处两侧电容器组, 先对合环处电压高的一侧进行调节, 调节方法是减小电容器组数。若电压高的一侧无补偿电容器或减小到零仍无法满足合环条件, 又或者电容器再继续切除效果反而变差, 则在电压低的一侧增加电容器组数, 电容器增加的上限为变压器容量的 50%, 直到满足合环条件或调节到上限, 又或者再继续上调效果反而变差, 则结束电容器的调节。

(3) 限流电抗器的调节方案。在合环处串接限流电抗器, 用户进行限流电抗器上限的设定, 若无设定, 则不进行限流电抗器的调节; 若设定限流电抗器的上限值, 根据设定的限流电抗器最大值进行分级调节, 逐级增大电抗器的值, 直到满足合环条件

或增大到上限，又或再继续上调效果反而变差，则结束电抗器的调节。

(4) 负荷重分配^[23-25]。通过拓扑搜索得到合环处潮流以下所有负荷，根据用户设定的负荷有功功率的上限和下限，先对电压高的一侧所有负荷进行调节，调节方法是自潮流末端负荷向上逐级进行负荷投入。若所有负荷调节都达到上限仍不满足合环条件，或负荷再继续投入效果反而变差，则对电压低的一侧所有负荷自潮流末端负荷向上逐级进行负荷切除，直到满足合环条件或调节到下限，又或者再继续调节效果反而变差，则结束对负荷的调节。

2.4 合环综合辅助决策设计

根据系统可以实现的调节措施确定四个措施，根据运行特点以及对合环操作的要求，对四个措施确定优先级需要考虑的四个指标，对四个指标进行重要性排序及赋值。针对各个措施在每种指标下进行标度值计算，结合指标重要性以及标度值得到各个措施的优先值，优先值由小到大的排序即为优先级由高到低的排序。合环操作中合环瞬间的冲击电流对系统影响最大，因此以合环冲击电流降低作为措施具体调节的量值目标，按照确定的措施优先级根据图3进行合环综合辅助调节。

3 算例分析

在所开发的配电网仿真建模平台上进行算法编程，前期已实现界面可视化配电网系统建模、界面

模型拓扑自主识别、潮流计算、合环稳态电流计算、合环暂态冲击电流计算，在此基础上实现配电网合环综合辅助决策算法。

以某城市实际配电网为例，进行算法可行性验证，算例如图4所示。变压器参数如表1所示，母线电压参数如表2所示，线路阻抗参数如表3所示。

根据本文提出的算法，对算例系统进行措施优先级确定，通过实验得到各个措施在各个指标下的物理量值 \hat{Q}_{jk_i} ，如表4所示。

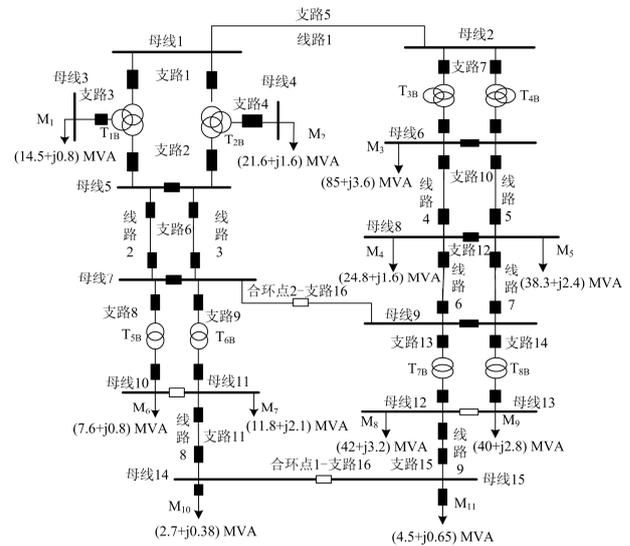


图4 某城市配电网模型

Fig. 4 A city distribution network model

表1 变压器参数

Table 1 Transformer parameters

变压器编号	高/中/低电压/kV	额定容量/(MV·A)	额定容量比	短路损耗/kW	短路电压/%	空载电流/%
T _{1B} 、T _{2B}	230/121/10.5	180	2:2:1	547.7/429.56/371.4	14.02/52.14/35.6	0.062
T _{3B} 、T _{4B}	220/121/10.5	180	2:2:1	514.3/203.4/148.6	13.2/23.5/7.72	0.065
T _{5B} 、T _{6B}	110/10.5	50	1:1	161.2	16.63	0.06
T _{7B} 、T _{8B}	110/10.5	50	1:1	176.227	17.1	0.081

表2 母线电压参数

Table 2 Bus voltage parameters

母线编号	1、2	5、6、7、8、9	3、4、10、11、12、13、14、15
电压/kV	220	110	10

表3 线路阻抗参数

Table 3 Line impedance parameters

线路编号	单位电阻/ (Ω·km ⁻¹)	单位电抗/ (Ω·km ⁻¹)	单位电纳/ (10 ⁻⁶ S·km ⁻¹)	长度/ km
1	0.062	0.432	0	2.5
2、3	0.063	0.270	4.492 2	7.9
4、5	0.056 5	0.214 5	26.381	4.8
6、7	0.054 5	0.237 8	21.889	6.1
8	0.257 3	0.247	0	2.655
9	0.193	0.185 4	0	2.58

表4 措施在指标下的物理量值

Table 4 Physical quantities of measures under indices

措施	指标			
	系统可靠性/ MW	系统稳定性/ kA	措施可 操作性	措施经济性/ MW
调节变压器	0	0.067 31	0	0.003 595
投切电容器	0	0.093 57	0	0.046 171
限流电抗器	0	0.147 6	0	0.099 997
负荷重分配	0.2	0.086 5	0	0.206 357

由表4可知，四个指标下基准值分别为 $\hat{Q}_{k1_{max}} = 0.2 \text{ MW}$ 、 $\hat{Q}_{k2_{max}} = 0.147 6 \text{ kA}$ 、 $\hat{Q}_{k3_{max}} = 0$ 、 $\hat{Q}_{k4_{max}} = 0.206 357 \text{ MW}$ ，通过式(1)求得标度值，代入式(8)得到

$I=0.037\ 253\ \text{kA}$, 可知 $I > I_{\max}$, 需要合环辅助措施进行调节, 合环综合辅助决策算法运行后的结果如图 8 所示。

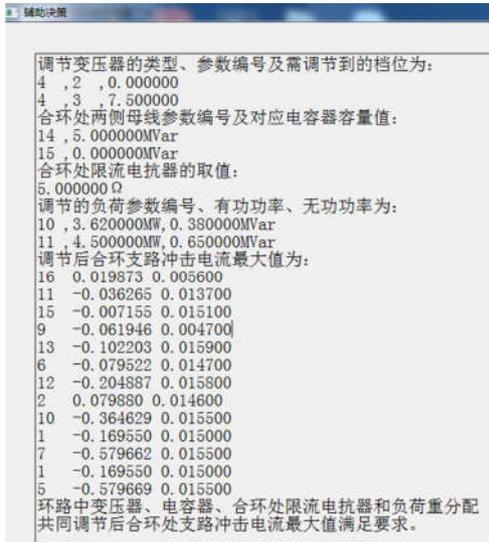


图 8 合环点 1-综合辅助决策结果

Fig. 8 Loop closing point 1 - hybrid aided decision-making result

按照本文综合辅助决策算法对合环点 1 进行措施调节, 调节前后的参数对照如表 6 所示。

表 6 合环点 1-调节前后措施参数

Table 6 Loop closing point 1 - measure parameters before and after adjustment

措施	变压器/%		电容器/Mvar		电抗器/ Ω	负荷/MW	
	T_{6B}	T_{7B}	14 号 母线	15 号 母线	合环点 1 支路	M_{10}	M_{11}
调节前 参数值	0	0	0	0	0	2.7	4.5
调节后 参数值	0	7.5	5	0	5	3.62	4.5

由图 8 和表 6 可知, 进行变压器分接头、补偿电容器、限流电抗器以及负荷重分配的综合调节后, 合环处冲击电流为 $0.019\ 873\ \text{kA}$, 此时 $I < I_{\max}$, 而且合环回路中其他支路冲击电流也都有所降低。例如支路 11, 调节前合环冲击电流最大值为 $-0.045\ 871\ \text{kA}$, 综合辅助决策调节后合环冲击电流最大值为 $-0.036\ 265\ \text{kA}$ 。按辅助决策进行参数调整即可满足合环要求。

3.2 合环点 2 算例分析

合环点 2 的措施调节条件设定如表 7 所示。

该合环处冲击电流上限设定值为 $0.15\ \text{kA}$, 即 $I_{\max}=0.15\ \text{kA}$ 。

对合环点 2 进行合环操作后, 合环回路中冲击电流计算结果如图 9 所示。

表 7 合环点 2-措施调节条件

Table 7 Loop closing point 2 - measure adjustment conditions

措施	设备名称	标识号	调节方案	原始设置
变压器	T_{1B}	类型 5, 编号 1	$\pm 2 \times 1.75\%$	1.75%
	T_{2B}	类型 5, 编号 2	$\pm 2 \times 1.75\%$	1.75%
	T_{3B}	类型 5, 编号 3	$\pm 2 \times 1.75\%$	1.75%
	T_{4B}	类型 5, 编号 4	$\pm 2 \times 1.75\%$	1.75%
电容器	无	左侧母线编号 7 右侧母线编号 11	上限 90 Mvar	0 Mvar
	电抗器	无	合环点 2 支路	$0\ \Omega$ $0\ \Omega$
负荷	M_6	编号 6	5~10 MW	7.6 MW
	M_7	编号 7	8~15 MW	11.8 MW
	M_8	编号 8	35~45 MW	42 MW
	M_9	编号 9	30~50 MW	40 MW
	M_{10}	编号 10	0~5 MW	2.7 MW
	M_{11}	编号 11	2~8 MW	4.5 MW

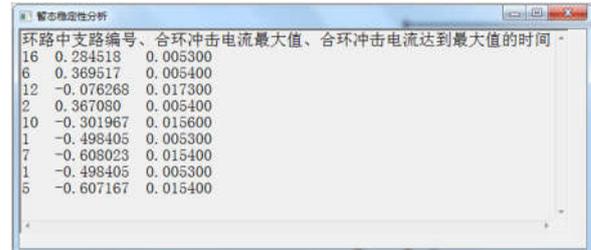


图 9 合环点 2-冲击电流结果

Fig. 9 Loop closing point 2 - surge current result

图 9 结果中第 1 列的环路支路编号对应于图 4 中支路号, 由图 4 可知合环点 2 支路编号为 16, 计算得到的合环处冲击电流为 $0.284\ 518\ \text{kA}$, 即 $I=0.284\ 518\ \text{kA}$, 可知 $I > I_{\max}$, 需要合环辅助措施进行调节, 合环综合辅助决策算法运行后的结果如图 10 所示。



图 10 合环点 2-综合辅助决策结果

Fig. 10 Loop closing point 2 - hybrid aided decision-making result

综合辅助决策算法运行后, 调节前后措施参数如表 8 所示。

表 8 合环点 2-调节前后措施参数

Table 8 Loop closing point 2 - measure parameters before and after adjustment

措施	设备名称	调节前参数值	调节后参数值
变压器	T _{1B}	1.75%	1.75%
	T _{2B}	1.75%	1.75%
	T _{3B}	1.75%	1.75%
	T _{4B}	1.75%	1.75%
电容器	7 号母线	0 Mvar	0 Mvar
	11 号母线	0 Mvar	0.5 Mvar
电抗器	合环点 2 支路	0 Ω	0 Ω
	M ₆	7.6 MW	10 MW
负荷	M ₇	11.8 MW	15 MW
	M ₈	42 MW	42 MW
	M ₉	40 MW	40 MW
	M ₁₀	2.7 MW	5 MW
	M ₁₁	4.5 MW	4.5 MW

由图 10 和表 8 可知, 变压器分接头无法进行调节, 即调节后合环处冲击电流反而会增大, 因合环处无限流电抗器, 因此未进行限流电抗器调节, 进行补偿电容器和负荷重分配共同调节后, 合环处冲击电流为 0.162 318 kA, 此时 $I > I_{max}$, 虽然合环处以及合环回路中其他支路冲击电流有所减小, 但仍不能满足合环处冲击电流设定值, 因此在设定的调节条件下不能进行合环操作。

在表 7 所示的措施调节条件基础上增加合环处限流电抗器条件的设定, 限流电抗器的上限设置为 1 Ω, 再进行综合辅助决策算法运行后结果如图 11 所示。



图 11 合环点 2-条件改变后综合辅助决策结果

Fig. 11 Loop closing point 2 - hybrid aided decision-making result after condition change

增加合环处限流电抗器调节措施后对合环点 2 进行措施调节, 调节前后措施参数如表 9 所示。

表 9 合环点 2-条件改变后的调节前后措施参数

Table 9 Loop closing point 2 - measure parameters before and after adjustment after condition change

措施	设备名称	调节前参数值	调节后参数值
变压器	T _{1B}	1.75%	1.75%
	T _{2B}	1.75%	1.75%
	T _{3B}	1.75%	1.75%
	T _{4B}	1.75%	1.75%
电容器	7 号母线	0 Mvar	0 Mvar
	11 号母线	0 Mvar	0.5 Mvar
电抗器	合环点 2 支路	0 Ω	0.03 Ω
	M ₆	7.6 MW	7.6 MW
负荷	M ₇	11.8 MW	11.8 MW
	M ₈	42 MW	42 MW
	M ₉	40 MW	40 MW
	M ₁₀	2.7 MW	2.7 MW
	M ₁₁	4.5 MW	4.5 MW

由图 11 和表 9 可知, 进行补偿电容器和限流电抗器的共同调节后, 合环处冲击电流最大值为 0.144 738 kA, 此时 $I < I_{max}$, 满足合环要求, 不需要再进行下一优先级措施(即负荷重分配)调节。

4 结论

本文提出的合环综合辅助决策算法, 首先根据实际情况进行指标重要性排序及赋值, 其次对每个措施在指标下进行标度值计算, 根据指标重要性赋值以及标度值得到多个措施优先级排列, 最后根据调节目标物理量确定每个措施的具体调节方案。算法根据实际系统可调节的具体情况进行综合辅助决策, 得到具体调节方案以及调节后合环回路中各支路冲击电流情况, 并给出决策判断。在所开发的配电网仿真平台上进行合环综合辅助决策算法编程, 通过实际算例进行算法验证。

本文算例考虑四个指标, 确定四个措施, 通过计算得到适合算例系统措施调节的优先级顺序, 并以合环冲击电流为调节目标物理量实现算法编程。其中算例合环点 1 设置的调节条件为四种措施都可进行调节, 算法运行后得到了各个措施在可调范围内的调节值, 调节后由回路中各支路冲击电流情况可知, 进行综合辅助决策调节后满足合环要求。算例合环点 2 不考虑限流电抗器调节, 只对其他三种可调措施在可调范围内进行调节, 从调节后计算的回路中各支路冲击电流可知, 进行综合辅助决策调节后不满足合环要求, 增加限流电抗器调节措施后, 合环支路冲击电流满足合环要求。通过算例验证了

本算法的可行性, 由平台运行结果验证了本算法可提高合环操作的灵活性、有效性和可操作性。

参考文献

- [1] XING Xuetao, LIN Jin, WAN Can, et al. Model predictive control of LPC-looped active distribution network with high penetration of distributed generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 3(8): 1051-1063.
- [2] 任嘉鑫. 基于在线自组织同步MAS的主动配电网合环控制方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
REN Jiabin. The loop closing control method based on online self-organizing synchronized MAS for active distribution network[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [3] 李文云, 曹敏, 李坤, 等. 考虑合环调电约束的配电网快速重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 159-164.
LI Wenyun, CAO Min, LI Kun, et al. A fast feeder reconfiguration method with loop closing network constraints considered[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 159-164.
- [4] 孔庆耀. 10 kV 配电网合环操作研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
KONG Qingyao. Research on loop closing operation for 10 kV distribution network[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [5] 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.
LIU Jian, SUN Quan, ZHANG Xiaoqing, et al. Analysis on and criteria for loop closing operation for distribution grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 130-135.
- [6] 冯欣桦, 黎洪光, 郑欣, 等. 计及不确定性的配电网合环点安全性与经济性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 30-36.
FENG Xinhua, LI Hongguang, ZHENG Xin, et al. Security and economy evaluation of closed loop point of distribution network considering uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 30-36.
- [7] 武鹏, 程浩忠, 刘育权, 等. 考虑合环约束的配电网重构方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 163-167.
WU Peng, CHENG Haozhong, LIU Yuquan, et al. Distribution network reconfiguration method considering loop closing constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 163-167.
- [8] 蔡万通, 刘文颖, 张宁, 等. 基于惩罚性变权最优综合评价模型的电磁环网解合环方案分析[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2316-2322.
CAI Wantong, LIU Wenyong, ZHANG Ning, et al. Analysis of electromagnetic loop network on loop closing or opening based on model of optimal comprehensive evaluation with punitive variable weight[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2316-2322.
- [9] 王星华, 徐炫壕, 甘德树, 等. 基于移动互联网的配电网在线合环计算软件设计方案[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 128-132.
WANG Xinghua, XU Xuanhao, GAN Deshu, et al. Software design of online loop closing and calculation of distribution network based on the mobile internet[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 128-132.
- [10] 周自强, 张焰, 郭强, 等. 基于概率潮流的 10 kV 配电网合环操作安全性评估[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1421-1428.
ZHOU Ziqiang, ZHANG Yan, GUO Qiang, et al. Security assessment of loop closing operation in 10 kV distribution network based on probabilistic load flow[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1421-1428.
- [11] 邓哲林, 刘宝柱, 董彬政. 复杂配电网合环电流调控的实用化策略研究[J]. 现代电力, 2012, 29(6): 11-16.
DENG Zhelin, LIU Baozhu, DONG Binzheng. Research on practical control strategy of closed-loop current in complex distribution network[J]. Modern Electric Power, 2012, 29(6): 11-16.
- [12] 肖程元. 复杂配电网的合环分析与调控措施研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
XIAO Chengyuan. Analysis and adjustment of closed-loop operation in complex distribution network[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2014.
- [13] 桂宝利. 城市配电网合环分析系统的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
GUI Baoli. Research on urban distribution network closed-loop operation analysis system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [14] 雷淮玉. 桂林城区配电网合环转负荷分析与对策研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
LEI Huaiyu. Analysis of closed redistribution load and measures research in distribution network[D]. Nanning: Guangxi University, 2015.
- [15] 蒋璧玉. 配电网合环运行电流分析及控制策略研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
JIANG Biyu. Analysis and control strategy research on distribution network closed-loop operation current[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [16] 徐久强, 张鹏宇, 张佳观, 等. 基于变采样周期的 CPS 多重优先级调度研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5):

- 193-198.
XU Jiuqiang, ZHANG Pengyu, ZHANG Jiaguan, et al. Research on cyber-physical systems multiple priority scheduling based on a variable sampling period[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 193-198.
- [17] YOUSEFIAN R, KAMALASADAN S. Energy function inspired value priority based global wide-area control of power grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 2(9): 552-563.
- [18] LIN Di, TANG Yu, VASILAKOS A V. User-priority-based power control in D2D networks for mobile health[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 4(12): 3142-3150.
- [19] 黄伟, 熊伟鹏, 华亮亮, 等. 基于动态调度优先级的主动配电网多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2018, 33(15): 3486-3496.
HUANG Wei, XIONG Weipeng, HUA Liangliang, et al. Multi-objective optimization dispatch of active distribution network based on dynamic schedule priority[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(15): 3486-3496.
- [20] WANG Yi, ZHANG Ning, LI Hai, et al. Linear three-phase power flow for unbalanced active distribution networks with PV nodes[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(3): 321-324.
- [21] WANG Xu, SHAHIDEHPOUR M, JIANG Chuanwen, et al. Three-phase distribution power flow calculation for loop-based microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 4(33): 3955-3966.
- [22] 陈艳波, 张智, 徐井强, 等. 广义快速分解潮流计算方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(6): 85-90.
CHEN Yanbo, ZHANG Zhi, XU Jingqiang, et al. Generalized fast decoupled load flow algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 85-90.
- [23] 李超, 苗世洪, 盛万兴, 等. 考虑动态网络重构的主动配电网优化运行策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3909-3918.
LI Chao, MIAO Shihong, SHENG Wanxing, et al. Optimization operation strategy of active distribution network considering dynamic network reconfiguration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3909-3918.
- [24] 李文云, 曹敏, 李坤, 等. 考虑合环调电约束的配电网快速重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 159-165.
LI Wenyun, CAO Min, LI Kun, et al. A fast feeder reconfiguration method with loop closing network constraints considered[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 159-165.
- [25] JAIN T, GHOSH D, MOHANTA D K. Augmentation of situational awareness by fault passage indicators in distribution network incorporating network reconfiguration[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 323-336. DOI: 10.1186/s41601-019-0140-6.

收稿日期: 2020-01-06; 修回日期: 2020-04-22

作者简介:

吴艳娟(1973—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统优化与控制、智能电网等; E-mail: wuyanjuan12@126.com

王皓月(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化与控制; E-mail: 2478152466@qq.com

杨理(1979—), 男, 硕士, 副高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制、电力系统规划等。E-mail: 12740935@qq.com

(编辑 许威)