

配电网合解环全过程综合优化调控

杨志芳¹, 李俊伟¹, 何 静¹, 王 勇¹, 万子恒², 彭 芙², 黄 纯²

(1. 云南电网有限责任公司昆明供电局, 云南 昆明 650011; 2. 湖南大学电气与信息工程学院 湖南 长沙 410082)

摘 要:配电网合解环操作能实现不停电转供电, 提高供电可靠性。为了保障合环操作的安全性和解环后配电网运行的经济性及电能质量, 提出统筹考虑合环、解环全过程的优化调控模型及算法。首先, 以无功补偿电容器、变压器分接头以及功率可控的分布式电源为调控手段, 以合环前和解环后调控的设备动作总次数最少、合环时环网馈线段的最大负载率最小及解环后网损及电压偏差最小为调控目标, 建立合解环综合优化调控数学模型; 然后, 利用配变的历史负荷推算配电网负荷功率, 提高合解环潮流计算的准确性; 最后, 采用多目标粒子群算法对调控优化模型求解, 获得合解环的 Pareto 最优调控方案集。根据配电网在不同场景下的合解环仿真结果验证所提调控方法的有效性。

关 键 词:配电网; 合解环; 多目标优化; 粒子群算法; 分布式电源

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.06.008

中图分类号: TM743

文章编号: 1673-9140(2022)06-0073-09

Integrated optimal control strategy of loop-closing and loop-opening operation in distribution network

YANG Zhifang¹, LI Junwei¹, HE Jing¹, WANG Yong¹, WAN Ziheng², PENG Fu², HUANG Chun²

(1. Kunming Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650011, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The loop-opening and loop-closing operation can avoid outage when switching power supply, thereby improving the reliability of distribution network. In order to ensure the safety of loop-closing operation as well as the economy and power quality after loop-opening, an optimal control strategy is proposed by considering the whole process of loop-closing and loop-opening operation in this paper. Compensation capacitors, transformer taps and distributed generation are utilized as control means. Meanwhile, the control target is set to minimize the times of device regulation before loop-closing and after loop-opening, the maximum load rate during loop-closing, the network loss and voltage deviation after loop-opening. Secondly, the historical load of distribution transformer is adopted to calculate the load power of distribution network, which improves the accuracy and real-time of power flow calculation. In addition, the multi-objective particle swarm optimization algorithm is applied to obtain the Pareto optimal set of control schemes. Finally, a practical example in different scenarios are included to verify the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: distribution network; loop-closing and loop-opening; multi-objective optimization; particle swarm optimization; distributed generation

收稿日期: 2021-05-20; 修回日期: 2021-09-11

基金项目: 云南电网有限责任公司科技项目(YNKJXM20190028)

通信作者: 杨志芳(1974—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统分析与控制研究; E-mail: 18088414910@qq.com

中国中压配电网一般采用闭环设计、开环运行的供电方式^[1]。当进行故障处理、负荷转移和设备检修时,通过先合环后解环操作可以实现不停电转移负荷,从而提高供电可靠性。然而在执行合环操作时,若合环点两侧电压差过大或者合环点两侧馈线的负荷、线路阻抗参数分布不均匀,合环过程中将产生较大的合环电流,可引起馈线过负荷、出口断路器跳闸等问题,导致合环失败,甚至会引起更严重的停电事故,直接影响到配电网安全运行^[2]。因此,为了实现安全合环,在合环前需计算合环电流,如果合环电流过大,则采取相应的调控措施。合环成功且解环后,配电网可能需要再次调控,使其处于最优的运行状态。

针对 10 kV 中压配电网合环操作及调控问题,专家学者们做了大量研究。文献[3]阐明了合环操作的目的,揭示了合环电流过大的机理,给出了允许合环操作的条件;文献[4]提出了三相不平衡条件下低压配电网的合环电流计算方法;文献[5]建立了考虑主网等值并计及变压器非标准变比影响的配电网合环等值网络,并提出了 3 种综合考虑计算复杂度和结果精确度的合环稳态电流的实用计算方法;文献[6]提出基于戴维南等值的配电网合环冲击电流计算方法;文献[7]结合拓扑搜索,实现了合环回路中所有支路冲击电流的精确计算;文献[8]分析了合环稳态电流与暂态冲击电流的数值关系,指出工程中只要合环稳态电流不超过馈线容许载流量即可允许合环,简化了合环判断条件;文献[9]提出了一种考虑合环约束条件的网络重构方法,能在满足合解环调电安全性条件下,降低解环后网损,为网络重构提供最优的合解环点;文献[10]采用半不变量法求取合环电流的概率分布特性,并通过电流越限概率和越限程度对合环操作的安全性进行定量评估;文献[11]分析了分布式电源(distributed generation, DG)对合环电流及其调控的影响;文献[12]提出了一种结合模拟退火和粒子群的协同算法求合环电流调控模型,并将 DG 的影响体现在模型的约束方程中;文献[13]采用调整无功补偿电容器和网络重构两种方式进行合环调控;文献[14]将变压器分接头和无功补偿器作为调控手段,建立了合环调控的多目标优化数学模型,以合环电流大小和合环

时的网损作为目标函数;文献[15]提出考虑合环电流约束的主动配电网转供优化模型,并通过改变 DG 出力减小合环电流。

上述研究通过稳态暂态合环电流计算、调控和风险评估等,保障合环的安全性。但目前对合解环综合调控的研究较少,且在调控模型和算法方面存在一些不足。其一,现有调控只关注合环过程,而忽视解环后配电网的再调控。配电网转供电时合环运行状态持续时间较短,一般只有几分钟,一些调控方法以合环时的网损和电压质量为优化目标,意义不大;解环后配电网拓扑发生变化,往往会偏离最优运行点,需要二次调控。现有将合环前调控和解环后调控分离考虑的做法难以做到全局最优。其二,要实施合解环在线调控,需要实时计算合环潮流,但受配电网自动化水平的限制,目前较难获取 10 kV 配电网的负荷数据,大部分调控方案只能是离线计算,时效性较差。其三,大部分调控方法未将 DG 纳入合解环调控手段,而相较于调节电容器和变压器分接头, DG 调节电压更平滑,有必要加以利用。

针对以上问题,本文提出一种统筹考虑配电网合解环转供电全过程的综合优化调控策略。该策略以无功补偿电容器、变压器分接头、功率可控的 DG 为调控对象,将配电网合环、解环作为一个整体进行统筹优化决策,全面考虑合环过程的安全性和解环后配电网持续运行的经济性和电能质量,并使整个调控过程中设备的动作总次数最少。此外,提出合解环时配电网负荷功率的获取方法及合解环实时调控的实现方案。

1 配电网合解环优化调控的数学模型

1.1 配电网合解环综合优化调控思路

配电网的合解环调控包含 2 个阶段。首先是合环前的调控,主要目的是使合环电流小于合环回路上各馈线段的容许载流量和电流保护整定值,确保合环的安全性。其次是解环后的优化调控,主要目的是让解环后的线路保持在最优的运行状态。尽管 2 个阶段的调控目的不同,但目前都是通过调节线路所属变电站的电容器投运组数、主变分接头的位置以及改变线路中的电压分布来实现的。

由于这 2 个阶段调控是按顺序进行的,合环前的调控方案将直接影响解环后的调控方案,二者间存在较大的耦合关系。单一阶段下的最优调控方案未必是全局最优,因此,需要将合环和解环作为统一的整体,综合设计合环前和解环后的调控方案。

对于含 DG 的配电网,如果 DG 出力不可控且波动性比较大,一般不让 DG 参与调控。而对于能被配网调度中心实时控制输出功率的 DG,如小水电^[16]、燃气机组等,则可利用 DG 的调压能力进行合解环调控。

1.2 优化调控的目标函数

1) 合解环调控设备总动作次数。

电容器投运组数和变压器分接头都不宜频繁地进行调节,否则会造成设备损耗,影响使用寿命。同时,考虑到操作的便利性,也希望合解环调控过程中尽可能减少调控设备的总动作次数。设立优化目标函数 1:

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^2 (|k_{T_i}^1 - k_{T_i}^0| + |k_{T_i}^2 - k_{T_i}^1|) + \sum_{i=1}^2 (|Q_{C_i}^1 - Q_{C_i}^0| + |Q_{C_i}^2 - Q_{C_i}^1|) \quad (1)$$

式中 f_1 为调控设备总的动作次数; $k_{T_i}^0$ 、 $k_{T_i}^1$ 和 $k_{T_i}^2$ ($i=1,2$) 分别为变压器 T_i 分接头的初始位置、第 1、2 次调控后的位置; $Q_{C_i}^0$ 、 $Q_{C_i}^1$ 和 $Q_{C_i}^2$ ($i=1,2$) 分别为无功补偿设备 C_i 的初始投入组数、第 1、2 次调控后的投入组数。

式(1)中,电容器投入组数增加或减少 1 组,算 1 次调控,变压器分接头改变 1 挡也算 1 次调控。DG 调控不算入调控次数。

2) 合环时合环回路馈线负载率。

配电网馈线包括许多段,不同段的线径不尽相同,且常有架空、电缆混合线路,各段容许载流量不等,合环时流过馈线各段的电流应不大于其容许载流量,即各馈线段的负荷率应不大于 1。考虑到合环电流计算时因负荷、线路参数的不准确性而存在一定误差,馈线段的负载率还应留有一定裕度,线路负载率越小合环越安全。因此,设置合环回路各馈线段的最大负载率最小为优化目标函数 2:

$$\min f_2 = \max \left\{ \frac{I_1}{I_{1\max}}, \dots, \frac{I_n}{I_{n\max}}, \dots, \frac{I_N}{I_{N\max}} \right\} \quad (2)$$

式中 f_2 为合环时合环回路馈线段最大负载率; N

为 10 kV 合环回路中馈线段的总数; I_n 、 $I_{n\max}$ 分别为馈线段 n 的电流有效值、容许载流量。

3) 解环后配电网有功损耗和电压偏差。

合环、解环操作在几分钟内即可完成,因此,合环期间不对网损和节点电压做严格要求。解环后配电网持续运行时间长,为了实现经济运行,选择解环后的系统网损作为优化目标函数 3:

$$\min f_3 = \sum_{i=1}^N I_i^2 r_i \quad (3)$$

式中 f_3 为配电网解环后的网损; N 为解环后配电网支路总数, I_i 、 r_i 分别为第 i 条支路上的电流、电阻。

解环后系统潮流发生改变,且可能出现因一侧馈线长度明显增加而导致线路末端电压偏差过大的情况。为保证解环后的电压质量,以解环后配电网各节点电压偏离期望值最小为优化目标函数 4:

$$\min f_4 = \frac{1}{G} \sum_{j=1}^G \frac{|U_j - U_j^{\text{spec}}|}{U_j^{\text{spec}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中 f_4 为电压偏移度; G 为节点总数; U_j 、 U_j^{spec} 分别为解环后节点 j 电压的实际值、期望值。

1.3 约束条件

1) 潮流平衡约束。

$$P_{Gi} - P_{Li} =$$

$$U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (5)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} =$$

$$U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (6)$$

式(5)、(6)中 P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为合解环电网电源注入的有功、无功功率; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为负荷消耗的有功、无功功率; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间的电导、电纳; θ_{ij} 为节点 i 、 j 之间电压相角差。

2) 电压幅值约束。

$$U_{j\min} \leq U_j \leq U_{j\max}, j = 1, 2, \dots, G \quad (7)$$

式中 U_j 为节点 j 的电压; \max 、 \min 分别表示允许电压的最大值、最小值; G 为节点总数。

3) 分布式电源、补偿电容器和变压器分接头约束。

$$\begin{cases} S_{DG_i \min} \leq S_{DG_i} \leq S_{DG_i \max} \\ Q_{C_i \min} \leq Q_{C_i} \leq Q_{C_i \max} \\ k_{T_i \min} \leq k_{T_i} \leq k_{T_i \max} \end{cases} \quad (8)$$

式中 S_{DG_i} 为分布式电源 DG_i 的视在功率; Q_{C_i} 为无功补偿设备 C_i 的投入组数; k_{T_i} 为变压器 T_i 的分接头位置。

2 配电网合解环优化调控模型求解

2.1 多目标粒子群优化算法

粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 通过群体中个体粒子之间的协作和信息共享寻找最优解。算法中每个粒子 i 代表寻优问题的一个解, 按公式不断更新其速度 v_i 和位置 s_i , 通过迭代寻求问题的优化解^[17-18], 即

$$\begin{cases} v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 [p_{best,i} - s_i(t)] + \\ \quad c_2 r_2 [g_{best} - s_i(t)] \\ s_i(t+1) = s_i(t) + v_i(t+1) \end{cases} \quad (9)$$

式中 t 为迭代次数; $\omega, c_1, c_2 \geq 0$, ω 为惯性权重, c_1, c_2 为加速系数; r_1, r_2 为区间 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数; $p_{best,i}$ 为粒子 i 的个体最优位置; g_{best} 为群体的全局最优位置。

合解环调控模型有多个目标函数, 引入 Pareto 最优解机制, 采用多目标 PSO 求解。在基于 Pareto 最优解的多目标优化中, 若 $f_k(x_1) \leq f_k(x_2)$, $\forall k = 1, 2, \dots, M$ 成立, 则称解 x_1 Pareto 占优解 x_2 , 其中, f_k 为第 k 个优化目标函数, M 为优化目标的数目。

在多目标 PSO 算法中, 每次迭代仍按式 (9) 更新各粒子的位置和速度, 而个体最优位置 $p_{best,i}$ 和全局最优位置 g_{best} 的更新规则如下: 当粒子 i 迭代产生新解后, 若旧解占优新解, $p_{best,i}$ 不变; 若新解占优旧解, 将新解位置作为 $p_{best,i}$; 若新解与旧解互不占优时, 随机选择其中一解的位置作为 $p_{best,i}$; 当粒子迭代更新后, 最优解集也随着更新, 从更新的解集中随机选择一粒子位置作为 g_{best} 。

2.2 配电网合解环转供电调控算法流程

利用多目标 PSO 对配电网合解环转供电调控模型进行求解, 其具体步骤如下。

1) 首先设定 PSO 中的粒子维数 D 、种群规模 N_{size} 和算法最大迭代次数 T_{max} , 并对权重系数 ω 和加速系数 c_1, c_2 进行初始化设置。

2) 基于各变量的约束条件生成粒子的初始位置, 每个粒子代表一个调控方案, 包含以下维度: 变压器 T_i 第 1、2 次调控的分接头位置 $k_{T_i}^1$ 和 $k_{T_i}^2$ ($i = 1, 2$), 无功补偿装置 C_i 第 1、2 次调控的投入组数 $Q_{C_i}^1$ 和 $Q_{C_i}^2$ ($i = 1, 2$), 分布式电源 DG_i 第 1、2 次调控的无功出力 $Q_{DG_i}^1$ 和 $Q_{DG_i}^2$ ($i = 1, 2, \dots, N$)。在设置好粒子的初始位置之后再对每个粒子进行速度初始化。

3) 根据生成的粒子, 确定配电网变压器变比、电容器无功补偿功率和 DG 无功出力, 然后进行合环、解环潮流计算, 得到每个粒子对应的目标函数, 即适应度, 求其 Pareto 最优解集。

4) 根据多目标 PSO 的进化策略, 确定各粒子的个体最优解 p_{best} 以及该种群的全局最优解 g_{best} , 并由式 (9) 更新各粒子的位置和速度。

5) 若满足收敛条件或达到最大迭代次数, 则输出 Pareto 最优解集, 其中每一个解为一合解环调控方案; 若不满足收敛条件则返回步骤 3) 再次迭代。

算法流程如图 1 所示。

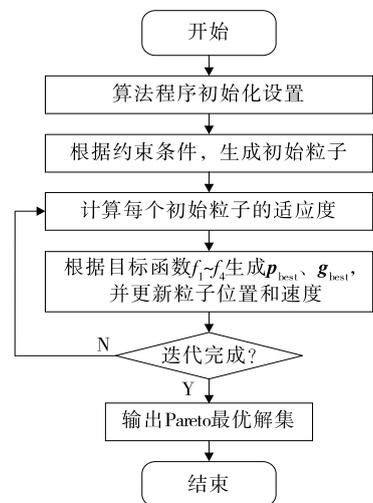


图 1 配电网合解环转供电调控算法流程

Figure 1 Flow chart of control algorithm for distribution network loop-closing and loop-opening

采用上述方法得到的多目标合解环优化调控的解不是唯一的, 而是一个 Pareto 最优解集。解集中某个解可能在一个或几个目标上是最优的, 而在其他目标上劣于其他解。合环调度人员可根据情况从最优解集中选取其中一个解作为合解环的调控方案。

3 合环分析及潮流计算

在合环调控优化求解过程中,需进行电网潮流计算,以获得节点电压、支路电流,进而计算目标函数和约束条件中的网损、电压偏差、馈线段负载率等。

3.1 合环馈线上节点负荷的获取方法

负荷功率是潮流计算的基础数据。合环分析时配网潮流计算需要获取合环馈线上负荷功率,即配变变压器的有功和无功功率。目前,配电网自动化水平参差不齐,对于自动化程度高的配电网,配变安装有配变终端(transformer terminal unit, TTU), SCADA 系统可以将配变的有功、无功功率实时上传到配电网调控中心。但是,对于大部分配电网,配变没有安装 TTU,或者受通信信道传输质量和速率的限制,配变的计量装置每天只能定时将采集的负荷数据上传计量中心,调控中心无法短时间内及时获取配变的实时负荷数据。

基于上述情况,考虑到目前大部分配电网已实现营配数据贯通,可以在合环分析时及时获得配变的历史负荷信息,本文借鉴负荷预测的思想,利用配变的历史负荷数据,推算合解环时配电网各节点负荷。由于合环馈线的总负荷可以从调控中心实时获取,本文利用合环当日已知的馈线总负荷的时间序列,通过有功功率相似日的方法预测馈线上各配变的有功和无功负荷。具体步骤如下:

1) 提取合环时刻前 2 h 的馈线总负荷有功、无功功率序列,分别记为 $\mathbf{P}_{\text{Feeder}}$ 、 $\mathbf{Q}_{\text{Feeder}}$;

2) 从计量系统中提取馈线上待预测配变的前 28 d 对应合环时刻前 2 h 的负荷有功功率,记为 $\mathbf{P}_T = [\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \dots, \mathbf{P}_k, \dots, \mathbf{P}_N]$,其中 $N = 28 \text{ d}$;

3) 分别计算 \mathbf{P}_T 中第 k 日历史有功功率序列 \mathbf{P}_k 与馈线有功功率序列 $\mathbf{P}_{\text{Feeder}}$ 的皮尔逊相关系数,并将相关系数最大的一天称为该配变的负荷相似日;

4) 按步骤 2)、3),获得馈线上所有配变的负荷相似日;

5) 由于负荷的功率因数通常较为固定,所以,将各配变负荷相似日的有功、无功负荷作为该配变合

环日的预测有功、无功负荷,将所有配变的预测有功、无功负荷相加,得到馈线预测总有功、无功负荷,分别记为 $\tilde{\mathbf{P}}_{\text{Feeder}}$ 、 $\tilde{\mathbf{Q}}_{\text{Feeder}}$;

6) 比较馈线预测功率 $\tilde{\mathbf{P}}_{\text{Feeder}}$ 、 $\tilde{\mathbf{Q}}_{\text{Feeder}}$ 与实际功率 $\mathbf{P}_{\text{Feeder}}$ 、 $\mathbf{Q}_{\text{Feeder}}$,忽略网损,对预测功率进行修正,即将各配变相似日的有功、无功功率分别乘以系数 λ_P 、 λ_Q ,其结果作为该配变合解环时的有功、无功负荷功率; $\lambda_P = \mathbf{P}_{\text{Feeder}} / \tilde{\mathbf{P}}_{\text{Feeder}}$, $\lambda_Q = \mathbf{Q}_{\text{Feeder}} / \tilde{\mathbf{Q}}_{\text{Feeder}}$, λ_P 、 λ_Q 可反映负荷预测的精度,若 λ_P 、 λ_Q 均接近 1,说明预测精度较高,否则精度较低。

按上述步骤可得到各配变合环前 2 h 内的负荷序列,取最接近合环时刻的负荷功率用于合解环分析时的潮流计算。

3.2 合环分析及潮流计算的实现流程

为便于叙述,以 10 kV 合环馈线的变电站出口开关为界,将合环网络分为 10 kV 及以上电压等级的主网和 10 kV 电压等级的配网;合环分析及潮流计算涉及主网和配网。

电网设备及其连接关系常通过公共信息模型(common information model, CIM)描述,以实现电网不同应用软件的互联,并以 XML 文件的方式发布。本文根据主网推送的 CIM 模型文件和含有实时遥信、遥测数据的 DT 文件,通过文件解析和网络拓扑分析,获得合环回路主网部分的拓扑结构、设备参数和节点注入功率,采用牛顿—拉夫逊法进行合环回路主网部分的潮流计算,并得到合环馈线首端电压(所在 10 kV 母线电压)、电流和功率。

合环前通过解析 2 条合环馈线的 XML 文件,获得馈线的拓扑结构及参数。以 10 kV 母线为根节点和平衡节点,采用前推回代法分别计算 2 条馈线潮流,获得合环联络开关两侧电压及电压相量差。同时,通过主网和配电网拓扑拼接,获得合环回路总阻抗。然后,采用叠加原理计算合环后回路上各支路电流,它们由 2 部分叠加而成:①合环前潮流计算得到的各支路电流;②合环点两侧电压相量差产生的环流,其值为电压相量差除以合环回路总阻抗。

解环后依然采用前推回代法分别计算解环的 2 条馈线的潮流,得到馈线上各节点的电压、各线路段的电流及功率,并计算网损。

4 算例分析

为了验证本文调控策略的有效性,对某地区 10 kV 配电网合解环转供电实例进行分析。经主网和配电网 XML 文件解析和拓扑分析,得到简化后的合环回路,如图 2 所示;主网各节点功率从 DT 文件获得,配网各节点负荷功率通过负荷预测得到。

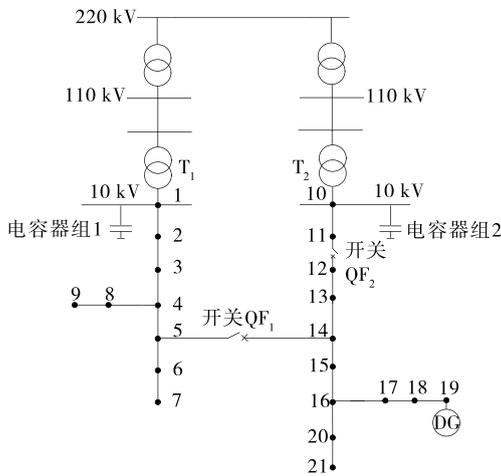


图 2 配电网合环算例模型

Figure 2 Model of loop-closing example

转供电前开关 QF_1 断开、 QF_2 闭合,2 条 10 kV 馈线均开环运行。合解环时 2 条 10 kV 馈线先通过闭合开关 QF_1 合环,合环完成后断开开关 QF_2 进行解环,完成不停电转供电。

对于 2 条合环馈线所在的 10 kV 母线,即节点 1、10 处各配置有无功补偿电容器组 3×1.8 MVar;变压器 T_1 变比为 $(110 \pm 8 \times 1.25\%) / 10.5$,变压器 T_2 变比为 $(110 \pm 5 \times 1.25\%) / 10.5$ 。节点 19 处接入有可调控的小水电 DG,其有功出力在合解环时保持不变(设为 1 MW),无功出力范围为 $0 \sim 0.4$ MVar。10 kV 馈线分为多段,含电缆和架空线路,型号不尽相同。其中馈线段 1-4、10-16 的容许载流量分别为 530、450 A,其余馈线段的容许载流量均为 330 A,馈线中各节点电压容许偏差范围为 $\pm 7\%$ 。

合环操作前 2 台变压器分接头位于 0 档位,各节点补偿电容器投入组数为 0,同时小水电 DG 输出的无功功率为 0。

设置 4 个合解环场景。场景 1:不进行调控,以初始状态直接完成合解环转供电操作;场景 2:仅变

压器分接头和补偿电容器参与调控过程,DG 不接入配网;场景 3:变压器分接头、补偿电容器和 DG 均参与调控,三者协同配合;场景 4:变压器分接头、电容器和 DG 均参与调控,但优化目标中不考虑调控设备的总动作次数。其中,场景 2、3 优化目标中均考虑调控设备的总动作次数。

调控结果如表 1 所示,考虑篇幅限制,场景 2、3、4 各仅选取 6 个解(调控方案)的调控结果用以展示;由场景 1 中的数据可得,若在配网合解环过程中不进行调控,则合环时配网馈线的最大负载率将高达 93.79%,且解环后配网有功损耗较大,为 800.7 kW,某些节点电压偏差超出允许范围,配电网合环时的安全性和解环后的经济性及电能质量均难以得到保障。

表 1 不同合环场景的调控结果

Table 1 Control results under different loop-closing scenarios

场景	总调控次数/次	合环最大负载率/%	解环网损/kW	解环电压偏差/%	
1	0	93.79	800.7	电压超限	
	14	60.16	786.7	2.66	
	8	60.44	786.1	3.01	
	2	9	70.22	786.7	2.67
		9	64.05	786.7	2.66
		8	60.44	786.1	3.01
3	10	62.72	785.7	3.28	
	13	57.48	591.2	1.29	
	10	57.47	589.8	1.50	
	4	11	57.20	583.4	1.52
		12	62.26	584.7	1.39
		10	63.18	582.5	1.41
4	9	57.37	581.2	1.54	
	37	57.04	580.7	1.22	
	33	57.16	580.6	1.22	
	33	60.31	581.1	1.21	
	37	57.04	581.3	1.21	
	31	54.06	582.6	1.20	
	33	56.96	580.9	1.22	

各场景对应的调控方案如表 2 所示,其中, $k_{T_1}^1$ 和 $k_{T_1}^2$ 、 $k_{T_2}^1$ 和 $k_{T_2}^2$ 分别代表变压器 T_1 、 T_2 合环前、解环后分接头位置, $Q_{C_1}^1$ 和 $Q_{C_1}^2$ 、 $Q_{C_2}^1$ 和 $Q_{C_2}^2$ 分别代表合环两侧 10 kV 母线(节点 1、10)处合环前、解环后 2 次调控所投入电容器组数, Q_{DG}^1 、 Q_{DG}^2 为 DG 合环前、解环后的无功出力(kVar)。

表 2 各场景对应的调控方案

Table 2 Control measures of each scene

场景	$k_{T_1}^1$	$k_{T_2}^1$	$Q_{C_1}^1$	$Q_{C_2}^1$	Q_{DG}^1	$k_{T_1}^2$	$k_{T_2}^2$	$Q_{C_1}^2$	$Q_{C_2}^2$	Q_{DG}^2
1	0	0	0	0	—	0	0	0	0	—
2	-2	1	0	2	—	0	7	1	2	—
	-2	0	0	0	—	0	3	1	0	—
	0	1	0	1	—	0	6	1	0	—
	0	3	0	1	—	0	6	1	0	—
	-2	0	0	0	—	0	3	1	0	—
	-2	0	0	1	—	0	2	1	3	—
3	-1	2	2	2	27.3	0	4	1	0	149
	-1	2	2	2	28.7	0	3	1	2	173
	-1	1	3	1	51.7	1	3	3	2	242
	-1	1	2	2	47.0	1	4	3	2	208
	0	2	2	2	78.2	1	4	3	2	278
	0	2	3	1	65.1	1	3	3	2	322
	-7	-4	1	3	467.0	1	5	3	0	378
4	-7	-3	1	2	448.0	1	5	3	0	384
	-6	-2	1	1	422.0	1	5	3	0	353
	-7	-4	1	3	452.0	1	5	3	0	346
	-6	-3	2	2	397.0	1	5	3	0	288
	-7	-4	2	1	422.0	1	5	3	0	367

观察场景 2~4,通过调控均有效降低了合环时馈线最大负载率,改善了解环后的配网网损及电压偏差,且有 DG 参与调控时能取得更优的 Pareto 解。

将场景 2、3 下得到的 Pareto 最优前沿投影到不同目标函数构成的二维平面图中,结果如图 3 所示,对于场景 2、3,只有在最大负载率与动作次数的二维图中,两者的 Pareto 解互不占优,其余二维图中,有 DG 参与调控的场景 3 均能取到更优的 Pareto 解,说明 DG 参与调控能获得更好的合解环安全性、经济性和电能质量。

在场景 1~3 下,解环后的节点电压分布如图 4 所示。在不进行调控的场景 1 中,解环后节点 10 的电压为 1.08 p.u.,不满足电能质量要求,而馈线末端节点 21 的电压降到 0.934 p.u.。在场景 2 中,随着变压器分接头和无功补偿装置加入调控,电压整体有所改善,所有节点电压均维持在±7%以内。但末端节点 21 电压为 0.944 p.u.,已有越限风险。在场景 3 中,随着 DG 接入并参加调控,不仅将各节点电压控制在正常范围内,而且由于 DG 的无功支撑作用,末端节点 21 的电压明显提升,达到 0.978 p.u.,解决了了解环后长馈线首端电压越限、末端电压低的问题。

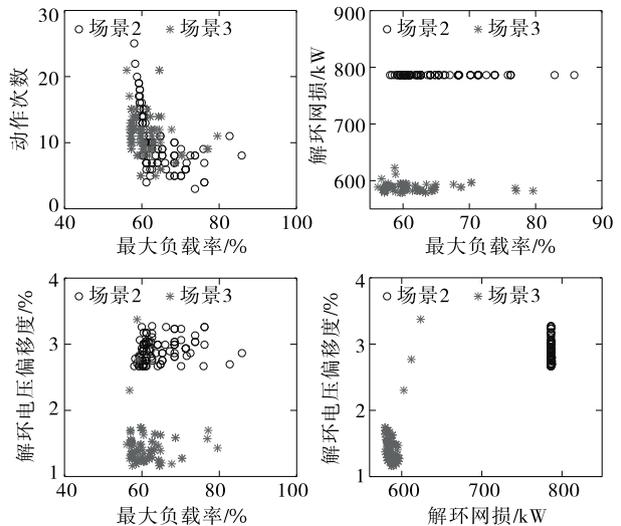


图 3 场景 2、3 的 Pareto 最优解分布

Figure 3 Pareto optimal distribution for scenario 2 and 3

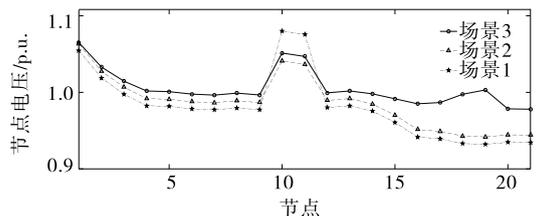


图 4 解环后节点电压分布

Figure 4 Node voltage distribution after loop-opening

场景3、4在调控手段相同的条件下进行合解环操作,但场景3中将合解环过程看作一个整体,对总的调控动作次数进行优化。结果表明:两者在合环时线路负载率、解环后网损及电压偏差方面的优化结果差异不大,但将调控次数设为优化目标后能显著减少设备动作次数,有利于延长设备使用寿命。

5 结语

本文提出一种统筹考虑配电网合解环全过程的多目标合解环调控的数学模型,给出了优化求解方法,提出了馈线负荷预测及合解环潮流计算方案。该方法具有以下特点:

1)统筹考虑配电网合解环全过程,能在保证合环操作安全性和解环后配电网运行经济性和高电压质量的前提下,减少调控设备的动作次数,减小调控对设备的影响,降低调控操作的复杂性;

2)通过利用计量系统的配变历史负荷推算合解环时的配变负荷,解决了10 kV中压配电网潮流计算难以获取负荷数据的问题;通过对主配网基于CIM模型的XML文件的解析和分析,实现了主配网合环潮流计算,为合解环转供电的实时调控提供了实现条件;

3)功率可调控的分布式电源参与合解环调控,能进一步减小合环电流,优化解环后配电网运行状态,具有应用前景。

参考文献:

- [1] 廖振宇,王红星,夏成军,等.广州地铁33 kV中压环网合环运行的初步分析[J].电力科学与技术学报,2008,23(3):84-90.
LIAO Zhenning, WANG Hongxing, XIA Chengjun, et al. Closed-loop operation analysis of 33 kV medium-voltage ring distribution networks for Guangzhou Metro[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2008, 23(3): 84-90.
- [2] 薛艳静,徐岩,程姝.基于电流变化的环状直流配电网故障定位方法[J].智慧电力,2021,49(2):76-82.
XUE Yanjing, XU Yan, CHENG Shu. Fault location method of ring DC distribution network based current variation[J]. Smart Power, 2021, 49(2): 76-82.
- [3] 据泽立,朱跃,蒲路,等.配电网电压综合补偿方法研究[J].高压电器,2020,56(4):235-240.
JU Zeli, ZHU Yao, PU Lu, et al. Study on the voltage integrated compensation method of distribution network [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 235-240.
- [4] 李家靖,严欣,袁佳欣,等.三相不平衡条件下低压配电网合环操作研究[J].电力科学与技术学报,2018,33(2):117-122.
LI Jiaping, YAN Xin, YUAN Jiaxin, et al. Study on closed loop operation of low voltage distribution network under three-phase unbalanced condition[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 117-122.
- [5] 张开宇,冯煜尧,余颖辉,等.中压配电网合环电流计算方法研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(1):142-149.
ZHANG Kaiyu, FENG Yuyao, YU Yinghun, et al. Study of calculation of current induced by closing-loop operation in medium-voltage distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 142-149.
- [6] 葛少云,李晓明.基于戴维南等值的配电网合环冲击电流计算[J].电力系统及其自动化学报,2007,19(6):124-127.
GE Shaoyun, LI Xiaoming. Study on surge current due to closing loop in distribution network based on thevenin's equivalent[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2007, 19(6): 124-127.
- [7] 吴艳娟,王皓月,杨理.配电网合环冲击电流精确算法[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(4):123-129.
WU Yanjuan, WANG Haoyue, YANG Li. Accurate algorithm for closing-loop surge current in distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2020, 32(4): 123-129.
- [8] 韩俊,谢珍建,耿路,等.中压配电网的高可靠性接线模式综合评估方法[J].中国电力,2020,53(3):91-100.
OHAN Jun, XIE Zhenjian, GENG Lu, et al. Research on comprehensive evaluation method of high reliability wiring mode for medium voltage distribution network[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 91-100.
- [9] 薄利明,陈尚,程雪婷,等.基于合作博弈的送端电磁环网解环量化评估方法[J].电测与仪表,2020,57(16):28-32.
BO Liming, CHEN Shang, CHENG Xueting, et al. The quantitative evaluation method for open-loop strategy for sending-type electromagnetic loop network based on

- cooperative game[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(16): 28-32.
- [10] 周自强,张焰,郭强.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): 1421-1429.
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): 1421-1429.
- [11] 刘馨.基于同步相量测量技术的配电网合环控制方法研究[D].武汉:华中科技大学,2017.
- [12] 赵泓霖.含分布式电源的配电网合环电流调控策略研究[D].济南:山东大学,2015.
- [13] 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 Baozhun, DONG Binzheng. Research on practical control strategy of closed-loop current in complex distribution network[J]. *Modern Electric Power*, 2012, 29(6): 11-16.
- [14] 刘松,黄纯.10 kV 配电网合环电流综合调控策略研究[J]. *控制与信息技术*, 2019 (6): 24-28+35.
LIU Song, HUANG Chun. Research on comprehensive control strategy of loop closing current in 10 kV distribution network[J]. *Control and Information Technology*, 2019 (6): 24-28+35.
- [15] 周念成,谷飞强,雷超,等.考虑合环电流约束的主动配电网转供优化模型[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(15): 3281-3291.
ZHOU Niancheng, GU Feiqiang, LEI Chao, et al. A power transfer optimization model of active distribution networks in consideration of loop closing current constraints[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(15): 3281-3291.
- [16] 彭杰,曹良丰,周力行,等.富含小水电的山区 10 kV 配电网电压质量改进方法, *电力科学与技术学报*, 2014, 29(1): 91-96.
PENG Jie, CAO Liangfeng, ZHOU Lihang, et al. Research on improved voltage quality in 10 kV distribution network located in SHP-rich mountain area[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2014, 29(1): 91-96.
- [17] PENG G, FANG Y W, PENG W S, et al. Multi-objective particle optimization algorithm based on sharing-learning and dynamic crowding distance[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(12): 5013-5020.
- [18] 孟巍,郭腾炫,刘昶娟,等.基于粒子群算法的多电源配电网储能功率配置方法[J]. *电网与清洁能源*, 2021, 37(11): 109-114.
MENG Wei, GUO Tengxuan, LIU Yijuan, et al. An energy storage configuration method for multi-power distribution network based on particle swarm algorithm[J]. *Power System and Clean Energy*, 2021, 37(11): 109-114.