

[智慧台区]

考虑激励型需求响应的供电台区三相负载不平衡优化治理方法

文/国网四川省电力公司南充供电公司 何浩 高东 张彪 王馨玥 谢翱

提出一种考虑激励型需求响应的台区三相负载不平衡优化治理方法。搭建智慧台区架构，以配电变压器三相出口功率不平衡最小为目标建立智慧台区的优化治理模型，将协调优化方法在算例中进行合理性及有效性验证。仿真结果表明，协调优化方法能有效治理台区三相负载不平衡，降低用户用能成本。

供电台区是连接配电网与用户的重要环节，其运行性能的好坏不仅影响着配电网运行质量的优劣，同时也直接关系着广大用户的用能体验。其中，三相负载不平衡会导致台区供电能力下降、运行损耗增加、运行温度升高等，是影响台区运行安全、可靠和经济等性能的不利因素，对其进行优化治理具有重要意义。

针对三相负载不平衡问题，传统方式是由人工到现场进行负载的相序调整，但该方式存在现场调整施工困难、调整时用户供电中断以及由于台区负载变化较为迅速导致调整周期难以确定等问题。在此基础上，有文献提出在低压线路上装设自动换相装置，通过对负载电流进行监测并对不平衡负载采用自动平衡分配的方法进行治理。该方法不仅需要消耗较大的装置安装成本，而且带负载情况下需要远程调整，其安全性和可靠性无法得到有效保障。有文献则进一步考虑了不确定性的影响，并提出通过户相关系识别、建立负载特征曲线以及负载动态规划等方法提升负载调整的准确度。但仍未对前述问题进行有效解决。

需求响应技术的大力发展为三相负载不平衡的治理提供了新的思路。通常有价格型需求响应和激

励型需求响应两种模式。前者通过合理制定电价来引导负载响应系统变化，后者则通过对用户进行有效补偿实现对灵活负载的转移和控制，以满足系统运行的需要。目前，采用需求响应技术进行三相不平衡治理的研究仍较少。有文献考虑不确定性的影响，在采用需求弹性矩阵描述负载变化与电价变化关系的基础上，应用模糊数学理论建立了台区三相负载不平衡的价格型需求响应优化治理模型，并通过算例分析验证了其良好的优化治理效果。但价格型需求响应需要用户侧具有较强的自主决策能力和互动意识，更加适用于未来市场化交易参与度较高的情况。针对目前广大公用台区内的中小用户缺乏市场参与条件和能力的情况下，以供电方为主导、平台集中决策的激励型需求响应模式将更加有效。

基于上述分析，以可进行激励型需求响应的智慧台区为研究对象，提出了一种台区三相负载不平衡的优化治理方法。首先，阐明了供电台区结构及考虑激励型需求响应参与的智慧台区优化治理模式；然后，建立了以三相负载不平衡最小为目标的数学优化模型；最后，通过在某供电台区进行算例分析，对所提优化治理方法进行了合理性及有效性验证。

智慧台区结构

智慧台区结构如图1所示。供电台区通常由配电变压器、低压线路、设备和用户等共同组成，一般采用三相四线制结构。供电方通过配电变压器及相应的线路和设备向用户供电，其各相供电功率分别为 P_A 、 P_B 和 P_C ；需求方接收来自供电方的电能，其各相负载需求分别为 L_A 、 L_B 和 L_C 。需求方具有一定的灵活负载，在日前阶段接收到供电方的激励时，可以在各运行时段内进行负载转移，各相转移的负载分别为 ΔL_A 、 ΔL_B 和 ΔL_C 。在该台区结构中，供电方期望通过对灵活负载的调节优化配电变压器三相负载不平衡情况，需求方则通过对灵活负载的调节获得补偿。相关的优化决策则在调控云平台中实现。如图1所示，供电方将预测的负载情况、激励补偿价格和变压器参数等相关信息传递至调控云台区管理单元，需求方则向调控云中的需求响应管理单元传递灵活负载等相关信息，调控云决策中心根据传递的相关数据及优化治理模型作出最优决策。

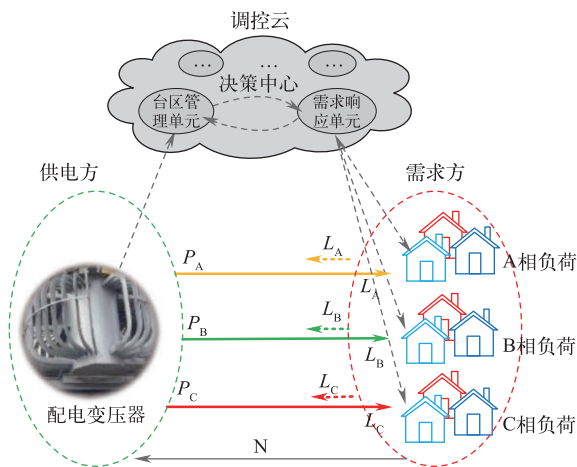


图1 智慧台区结构

台区三相负载不平衡的优化治理模型

1. 目标函数

调控云决策中心根据各方上传的数据，对次日一个周期24个时段的各相出口功率进行优化。以配电变压器各相出口功率与三相出口功率平均值之差的二次方和最小为目标，其优化模型如下。

$$\min f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{\varphi \in \{A, B, C\}} (P_{\varphi, t} - P_{av, t})^2 \quad (1)$$

$$P_{av, t} = \frac{\sum_{\varphi \in \{A, B, C\}} P_{\varphi, t}}{3} \quad (2)$$

式中， f_1 表示供电方优化目标； $t=1, \dots, T$ 为各运行时段， T 为最大时段，本文设为24； $\varphi \in \{A, B, C\}$ 表示各相位； $P_{\varphi, t}$ 为变压器 φ 相在时段 t 的出口功率； $P_{av, t}$ 为时段 t 各相平均出口功率。

2. 约束条件

约束条件如下

$$P_{\varphi, t} = L_{\varphi, t} \quad (3)$$

$$L_{\varphi, t} = L_{\varphi, t}^b + \Delta L_{\varphi, t} \quad (4)$$

$$0 \leq L_{\varphi, t} \leq L_{\varphi}^{\max} \quad (5)$$

$$0 \leq \Delta L_{\varphi, t} \leq \Delta L_{\varphi, t}^{\max} \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^T L_{\varphi, t} = \sum_{t=1}^T L_{\varphi, t}^0 \quad (7)$$

式中， $L_{\varphi, t}$ 表示 φ 相负载参与需求响应后在时段 t 的负载需求； $L_{\varphi, t}^b$ 表示 φ 相在时段 t 的固定负载； $\Delta L_{\varphi, t}$ 表示 φ 相在时段 t 的灵活负载； $\Delta L_{\varphi, t}^{\max}$ 表示 φ 相在时段 t 的灵活负载最大值； $L_{\varphi}^{\max}$ 表示 φ 相可容纳的最大负载； $L_{\varphi, t}^0$ 表示 φ 相在时段 t 的初始负载。

式(3)表示功率平衡约束，式(4)表示 φ 相在时段 t 的负载由固定负载和灵活负载构成，式(5)表示各时段各相的负载不能超过最大负载，式(6)表示 φ 相在时段 t 的灵活负载不能超过最大值，式(7)表示优化前后各时段的总负载不变。

算例分析

1. 算例参数设置

以某供电台区为仿真对象，其某日各相负载曲线及灵活负载曲线如图2所示。用户用能电价为0.522 4元/(kW·h)，需求响应补贴价格为0.8元/(kW·h)，并仅对转移出的负载进行补偿。各相最大负载设置为初始各相负载的最大值，灵活负载最大值设置为各相最大负载与各相固定负载的差值，即

$$L_{\varphi}^{\max} = \max_{t \in T} (L_{\varphi, t}^0) \quad (8)$$

$$\Delta L_{\varphi, t}^{\max} = L_{\varphi}^{\max} - L_{\varphi, t}^b \quad (9)$$

仿真计算在MATLAB R2017b中完成，使用YALMIP工具箱建模并使用内置求解器BMIBNB进行优化求解。

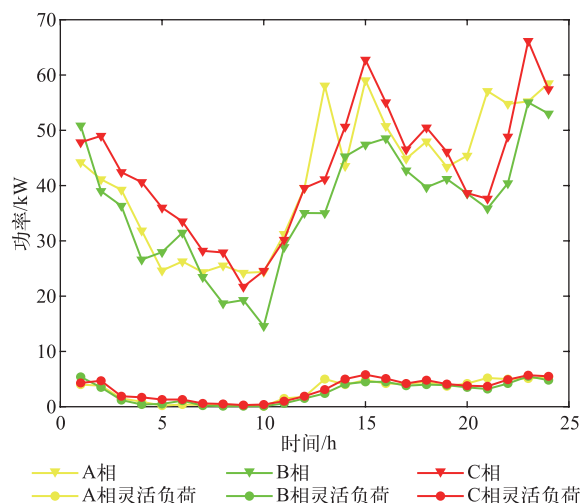


图2 优化前各相负载曲线

2. 算例结果分析

(1) 三相负载不平衡优化结果分析

优化后各相负载曲线及灵活负载曲线如图3所示。

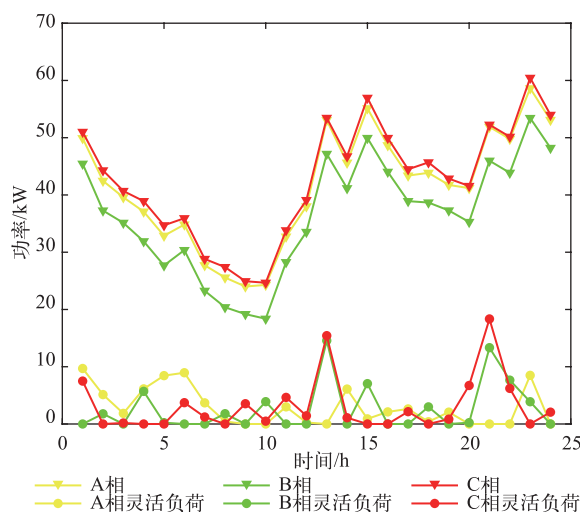


图3 优化后各相负载曲线及灵活负载曲线

比较图3与图2可知，通过对各相灵活负载的调节，优化后A相与C相负载趋于完全平衡，B相各时段的负载曲线与A、C相趋于平行。这表明，通过所提优化方法，台区三相负载不平衡情况得到了有效治理。其中，B相未能与A、C相完全平衡，是由于B相负载基数相对于A、C相较低，在该情况下，不能通过有限的灵活负载调节实现三相负载的完全平衡，而应通过对负载的长期统计分析，结合所提优化治理方法的情况下对负载进行长周期的现场改接。

(2) 相不平衡度分析

为进一步比较优化后台区三相不平衡情况，引入相不平衡度的概念进行优化前后的比较分析。相不平衡度表达式为

$$\beta_{\varphi} = \frac{I_{\varphi} - I_{av}}{I_{av}} \quad (10)$$

式中， β_{φ} 表示相不平衡度； I_{φ} 表示 φ 相电流； I_{av} 表示平均电流。

为简化分析，仅对三相电流不平衡、角度和电压平衡的情况下的不平衡度进行计算分析。根据式(10)计算出优化前后各时段各相不平衡度，如图4所示。

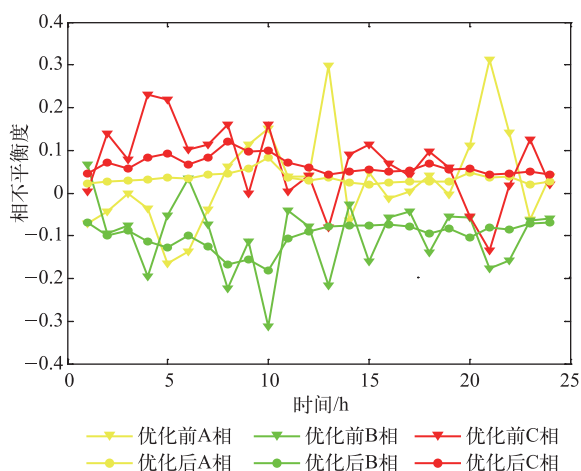


图4 相不平衡度

比较图4中优化前后各相不平衡度，可以看出，各相各时段优化后的不平衡度相对于优化前更平滑，各相不平衡度最大值取得了较大程度的降低，同时各相不平衡度从正负两个方向均更趋近于0。可进一步表明，经过优化后，台区各相负载趋于平衡，验证了所提优化治理方法的有效性。

(3) 经济性分析

台区三相负载不平衡治理的经济性需从供电方与需求方进行分析。

为简化分析，仅考虑由电流不平衡引起的供电方损耗。在三相负载不平衡的情况下，不平衡电流不仅会使得相线上的损耗增加，同时会使得零线上流过不平衡电流引起损耗。引入线损增加率，表示相较于三相平衡的情况下，台区低压线路在三相不

(下转第83页)

起动。风机停止过程中，风机起动后持续运行会降低设备的温度，控制器对通过监测模采集到的温度值和电流值进行逻辑判断，当温度和电流都小于返回值时，才可以达到停止条件，且经时间计数器保持一定时间后，风机停止。本装置逻辑功能的实现主要依赖于主控制器，根据电流、温度采集的数据进行判断，输出信号。负荷电流、温度起停风机技术和风机起停延时保持技术都通过主控制器实现。

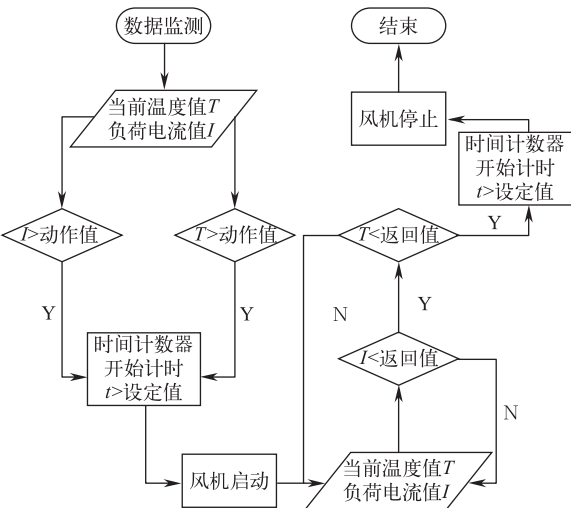


图5 负荷电流、温度双判据及风机启停延时保持流程

(3) 晶闸管控制技术

现有的传统10 kV大电流开关柜风冷控制系统均

采用控制接触器的通断实现风机的起停，该接触器触头为机械接触式触头，长时间的通断导致其容易损坏；因此设计研究的10 kV大电流开关柜风冷微机控制系统采用晶闸管控制技术，采用控制晶闸管的导通角，实现电流回路的通断，使风机回路起动或停止，有效杜绝了因接触器机械触头损坏而导致风机无法起停的回路缺陷。

结束语

10 kV大电流开关柜风冷微机控制系统集成应用了负荷电流、温度数据采集技术，负荷电流、温度双判据起动技术，风机起停延时保持技术以及晶闸管控制技术等关键技术，实现开关柜负荷电流、温度准确控制风机起停功能，避免风机频繁起停，并实现了对风冷控制系统的工作电源失电、风冷微机控制装置故障和风机故障等异常状况进行监测、告警，有效解决了传统10 kV大电流开关柜风冷控制系统存在的问题，排除安全隐患。当开关柜风冷控制系统故障告警时，调度人员可以及时调整开关柜负荷电流并通知变电运行部门消缺，确保开关柜安全可靠运行，提高了10 kV系统供电可靠性。该装置已在某供电局1座220 kV变电站中得到试点应用，自投运以来，运行效果良好。EA

(收稿日期：2021-08-30)

(上接第56页)

平衡情况下增加的额外损耗比例为

$$\lambda = 2(1 + \beta_A^2 + \beta_B^2 + \beta_A \beta_B) - \frac{2}{3}[(1 + \beta_A) \times (2 - \beta_A) + (1 + \beta_B)(1 - \beta_A - \beta_B)] \quad (11)$$

式中，λ表示仅考虑三相电流不平衡、角度平衡的情况下由三相负载不平衡引起的线路损耗增加率，并假设零线电阻为相线电阻的2倍。

根据式(11)并结合式(10)的计算结果计算出经过优化后，由三相不平衡导致的线损增加率从1.36降低至0.54，台区运行的线路损耗率有较大幅度的下降，体现了所提优化方法的经济性能。

对于需求方，其需求响应前后的用电成本见表1。可见，该台区用户仅通过少量灵活负载参与系统的优化运行，日用电成本即可降低67.40元，体现了良好的经济性。

表1 用户用电成本

(单位：元)

	电量电费	补偿电费	实际支出
响应前	1 511.24	0	1 511.24
响应后	1 511.24	67.40	1 443.85

结束语

提出了一种考虑激励型需求响应的智慧供电台区三相负载不平衡优化治理方法，并进行了实际算例的仿真分析，仿真结果表明所提方法可有效实现台区三相负载不平衡的优化治理，并提升台区运行的经济性。但需要指出的是，所提优化治理方法是基于调控云平台获得了灵活负载调度权，从而以供电方为主导进行集中决策的模式。如何实现用户自主响应的分布式决策以及补偿电价如何制定将是进一步的研究方向。EA

(收稿日期：2021-05-13)