

考虑光伏换相与柔性负荷协同的 配电网三相不平衡研究

高杉, 邢洁*, 单英浩, 顾怡

(东华大学信息科学与技术学院, 上海市 松江区 201620)

Research on Three-Phase Imbalance in Distribution Networks Considering Coordinated Photovoltaic Phase Switching and Flexible Load

GAO Shan, XING Jie*, SHAN Yinghao, GU Yi

(College of Information Science and Technology, Donghua University, Songjiang District, Shanghai 201620, China)

摘要: 【目的】考虑单相分布式光伏接入配电网后的影响, 针对低压配电台区三相不平衡问题, 提出了一种考虑柔性负荷响应协同光伏调节的低压配电台区三相不平衡治理方法。【方法】所提治理方法包含柔性负荷响应模式和光伏调节模式, 其中柔性负荷响应模式以网损和负荷调节成本最小为优化目标, 光伏调节模式以光伏换相次数最少为优化目标。采用不同编码策略的粒子群算法对这2种调节模式分别进行求解。最后, 以华北地区某实际低压配电台区为例对所提方法进行了验证。【结果】该方法降低了光伏换相动作次数和负荷响应的调节成本。此外, 通过分析权重系数对目标函数的影响, 给出了权重系数的建议范围。【结论】该方法能有效治理三相不平衡超限, 并减少治理成本。

关键词: 电力系统; 分布式光伏; 柔性负荷; 低压配电网; 三相不平衡; 换相开关; 三相潮流; 协调优化运行

ABSTRACT: [Objectives] Considering the impact of single-phase distributed photovoltaic integration into distribution networks, this study proposes a mitigation method for three-phase imbalance in low-voltage distribution station area by coordinating flexible load response with photovoltaic regulation. [Methods] The proposed mitigation method comprises a flexible load response mode and a photovoltaic regulation mode. The flexible load response mode has the optimization objectives of minimizing network losses and load regulation costs, while the photovoltaic regulation mode has the objective of minimizing the number of photovoltaic phase-switching operations. The particle

swarm optimization algorithm with different encoding strategies is used to solve the two adjustment modes respectively. Finally, the proposed method is validated using a real low-voltage distribution station area in North China. [Results] The results show that the method reduces the number of photovoltaic phase-switching operations and load response regulation costs. In addition, by analyzing the influence of weighting coefficients on the objective function, a recommended range for these coefficients is provided. [Conclusions] The method effectively addresses three-phase imbalance violations and reduces mitigation costs.

KEY WORDS: power system; distributed photovoltaic; flexible load; low-voltage distribution network; three-phase imbalance; commutation switch; three-phase power flow; coordinated optimal operation

0 引言

为了构建新型能源体系, 我国电力系统正在向新型电力系统转型^[1-5]。与传统电网电源构成不同, 低压配电系统中的清洁分布式电源比例逐渐增加, 而柔性负荷的参与也使得电力需求特性逐渐呈现市场化特征^[6-8]。这种新变化使得低压配电台区中由于各相负荷时空分布不均衡而产生的三相不平衡问题变得更为复杂^[9]。

为了解决三相不平衡引起的台区供电质量下降、效率降低等问题, 采取的措施通常有: 调整负荷相序^[10-12]、投切相间或分相电容补偿电流和无功^[13-14]、网络重构^[15-16]等。文献[17]考虑了有载调压变压器、静止无功补偿装置和投切电容器的控

制,并构建了无功优化模型,减小了电压负序分量。然而,调节无功的方法不能治理纯阻性负载引起的不平衡,并且存在电力电子变流器投资成本高、控制难等问题。文献[18-19]考虑了负荷空间分布和用电特性,采用聚类算法对用户进行聚类并预测,进而建立日前治理的三相不平衡优化模型。然而,负荷的随机性会使预测结果与实际运行情况有偏差,采用日前治理得出的结果往往与预测的期望存在差距。

随着配电物联网工作全面开展,电网公司在低压配电台区中配置了智能融合终端设备。依托该硬件平台和通过可供资源的协同优化,实现低压配电网的实时运行优化。文献[20]提出了智能终端设备结合换相开关的三相不平衡治理方法,实现了对台区三相不平衡的优化。文献[21-22]分别从治理效果和治理成本出发,建立了三相不平衡实时治理模型。以上文献的研究主要集中于运行过程中的负荷换相方法。然而,这种基于用户负荷换相的治理方案若要取得理想效果,需要安装较多的换相开关,并对用户进行频繁的换相调整,这不仅增加了安装成本,也影响了用电可靠性。

随着分布式电源在低压配电系统中的广泛应用、电力电子技术的飞速发展以及用户负荷的柔性化,低压配电网三相不平衡的治理手段变得越来越灵活^[23-26]。文献[27-28]以光伏和储能装置作为研究对象,通过考虑光伏逆变器无功调节和储能协调控制,减小了台区的三相不平衡度,提高了光伏接入配电网的消纳能力。文献[29]提出一种考虑光伏选相投切,并利用储能装置提升电压平衡能力的低压配电网三相平衡优化模型。以上研究考虑了光伏发电的间歇特性,并在夜间采用储能装置作为补充手段,但没有考虑储能具体的调度策略和可行性。

基于此,本文提出一种考虑光伏换相与柔性负荷协同调节的低压配电台区三相不平衡优化方法,用以解决含多个分布式光伏的低压配电台区三相不平衡越限问题。该方法包含了柔性负荷响应模式和光伏调节模式,此2种模式既可以单独使用,也可以联合使用,以应对配电网的复杂工况,不仅促进了新能源消纳,还减少了治理成本。

1 低压配电台区三相不平衡优化模型

本文提出的三相不平衡优化方法中,柔性负荷响应模式以网损最小、柔性负荷补偿成本最低为目标,光伏调节模式以换相动作次数最少为目标,并且考虑了潮流约束、节点电压约束、柔性负荷可调节功率约束、三相不平衡度约束、开关动作次数约束等条件。

1.1 目标函数

低压配电台区三相不平衡优化模型的目标函数为

$$\min[\alpha F(x) + \bar{\alpha} G(x)] \quad (1)$$

式中: $F(x)$ 为柔性负荷调节模式的目标; $G(x)$ 为光伏调节模式的目标; α 为0-1变量, $\bar{\alpha}$ 为 α 的非变量,当 $\alpha=0$ 时, $\bar{\alpha}=1$,而当 $\alpha=1$ 时, $\bar{\alpha}=0$,以用于选择不同调整模式下的目标函数。

2种调节模式的数学表达式如下:

$$F(x) = w_1 \frac{F_1(x)}{F_1^0(x)} + w_2 \frac{F_2(x)}{F_2^0(x)} \quad (2)$$

$$F_1(x) = \sum_{k=1}^l \sum_{\varphi} \operatorname{Re}(Z_{ij} I_{ij}^2) \quad (3)$$

$$F_2(x) = \sum_{\varphi} \sum_{r=1}^{R_{FL}} \rho_r^{\varphi} N_r^{\varphi} P_{\text{cut},r}^{\varphi} \quad (4)$$

$$G(x) = \sum_{j=1}^n M(j) \quad (5)$$

式中: $F_1(x)$ 、 $F_2(x)$ 分别为配电网网损和柔性负荷调节成本; $F_1^0(x)$ 、 $F_2^0(x)$ 分别为未优化前网损初始值、柔性负荷可补偿最大成本; w_1 、 w_2 分别为网损和负荷调节成本在柔性负荷调节模式下目标函数的权重,满足 $w_1+w_2=1$; k 为配电网线路编号; l 为配电网线路分段数; φ 为配电线路的相线,取A、B、C相; Z_{ij} 为支路 ij 的阻抗; I_{ij} 为支路 ij 的电流相量; r 为配电网柔性负荷编号; R_{FL} 为一相线路上柔性负荷的总数; ρ_r^{φ} 为柔性负荷补偿系数; N_r^{φ} 为柔性负荷状态,当柔性负荷响应调节时取1,否则取0; $P_{\text{cut},r}^{\varphi}$ 为柔性负荷响应功率; j 表示光伏编号; n 表示光伏的总数; $M(j)$ 为光伏 j 的换相次数。

1.2 模型的约束条件

1) 潮流约束

为了保证配电网安全稳定地运行,系统各节点的功率平衡方程约束如下:

$$\begin{cases} P_i - P_{PVi} = U_i \sum_{j=1}^m U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i - Q_{PVi} = U_i \sum_{j=1}^m U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (6)$$

式中： P_i 、 Q_i 分别为注入节点 i 的有功、无功功率； m 表示网络节点数； P_{PVi} 、 Q_{PVi} 分别为节点 i 上接入光伏发出的有功、无功功率； U_i 、 U_j 分别为节点 i 、 j 的电压幅值； G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点 i 、 j 线路之间的电导和电纳； θ_{ij} 为节点 i 、 j 两端电压的相角差。

2) 电压约束

根据GB/T 12325—2008《电能质量 供电电压偏差》中规定，220V单相供电电压允许偏差为额定电压的-10%~+5%，即

$$0.9U_N \leq U_i^{\phi} \leq 1.05U_N \quad (7)$$

式中： U_N 为额定相电压； U_i^{ϕ} 为节点 i 实际相电压。

3) 支路电流约束

支路电流约束为

$$|I_{ij}(t)| \leq I_{ij}^{\max} \quad (8)$$

式中： $I_{ij}(t)$ 为 t 时刻 ij 支路电流； I_{ij}^{\max} 为 ij 支路电流的最大允许值。

4) 柔性负荷可调节功率约束

低压配电网中的单相负荷大致可分为柔性负荷和刚性负荷。柔性负荷主要是以商业聚合负荷和智能家用负荷为主，在电价或补贴政策的激励下，有一定的需求响应动力和可调节范围。柔性负荷可调节功率约束为

$$P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max}, g \in f \quad (9)$$

式中： P_g 为第 g 个柔性负荷的实际负载； P_g^{\max} 、 P_g^{\min} 分别为第 g 个柔性负荷的最大、最小负载； f 为配电网柔性负荷集。

5) 三相不平衡约束

在实际工程中，三相电流不平衡度是表征配电网不平衡程度的常用指标^[30-31]，本文根据《配电网运维规程》计算三相电流不平衡度。

$$\varepsilon_I = \frac{I_{\phi}^{\max} - I_{\phi}^{\min}}{I_{\phi}^{\max}} \times 100\% \quad (10)$$

式中： ε_I 为三相电流不平衡度； I_{ϕ}^{\max} 、 I_{ϕ}^{\min} 分别为A、B、C三相中最大、最小相电流的有效值。

三相不平衡度约束条件如下：

$$\varepsilon_I \leq \varepsilon_{I,\max} \quad (11)$$

式中 $\varepsilon_{I,\max}$ 为三相电流不平衡度最大值。

6) 开关动作次数约束

为保障电网的稳定性，防止电网波动频繁，每一个光伏的换相开关动作次数不超过其动作上限 M_{\max} ，即

$$M(j) \leq M_{\max} \quad (12)$$

光伏的换相开关动作时，换相的瞬时可能会对光伏出力产生一定扰动，并且存在换相失败的风险，故引入换相风险补偿成本 $C_{sr}(t)$ 。其表达式为

$$C_{sr}(t) = \sum_{j=1}^{n_{PV}} P_{PVj}(t) N_{PVj} (\rho_{PV} + \lambda_{CF} \rho_{CF}) \quad (13)$$

式中： n_{PV} 为单相光伏的数量； $P_{PVj}(t)$ 为 t 时刻光伏 j 发出的有功功率； N_{PVj} 为光伏换相开关的动作状态，动作时为1，不动作时为0； ρ_{PV} 为光伏换相扰动补偿系数； λ_{CF} 为换相开关失败率； ρ_{CF} 为换相失败风险补偿系数。

当光伏得到换相调度指令时，根据式(13)计算补偿成本，给予光伏业主合理的风险补偿。

2 含柔性负荷和分布式光伏协同优化的低压台区三相不平衡治理方法

对于配置了智能终端的低压台区，可利用硬件平台的测量功能对柔性负荷和分布式光伏的状态信息进行采集，并通过协同优化治理方法得到调节策略，然后向执行终端发送控制指令来实现设备动作^[32]。

2.1 三相不平衡治理流程

本文提出的三相不平衡治理方法流程如图1所示，其中包含了2种调节模式：柔性负荷响应模式和光伏调节模式，可根据实际运行情况结合2种模式联合治理。柔性负荷响应模式是以负荷的有功作为可控制变量，在其可响应时段的可调整范围内进行调度，使测量点的三相电流不平衡度满足要求。光伏调节模式是通过合理调整光伏的接入相序，以起到平衡三相电流的作用。对于这2种调节模式，本文采用了不同编码形式的粒子群算法进行求解。

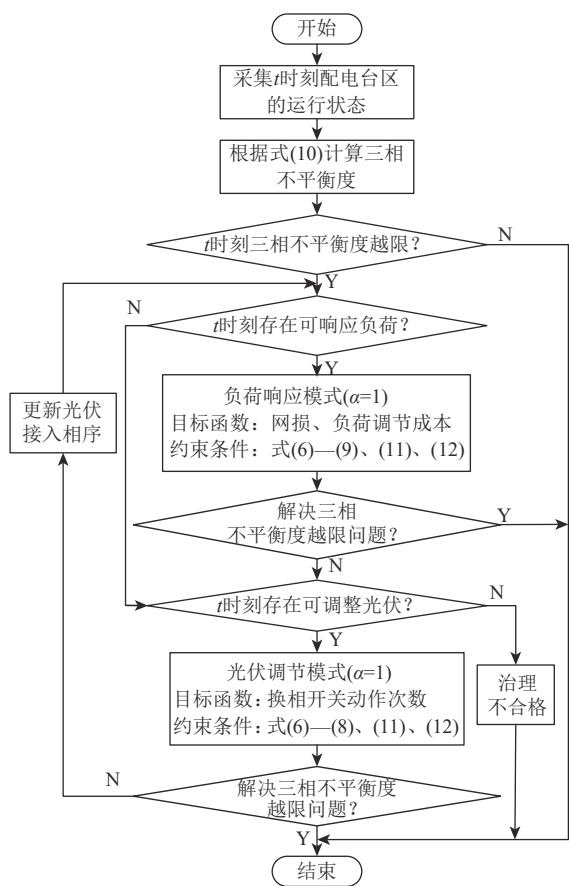


图1 三相不平衡治理方法流程

Fig. 1 Flowchart of three-phase imbalance mitigation method

2.2 模型的求解算法

粒子群算法以其全局搜索能力强、收敛速度快被广泛应用，其流程如图2所示。具体的算法步骤如下：

1) 读取当前网络参数信息，确定当前控制变量及其空间维数 D ，设置粒子种群规模 N 、最大迭代次数 k_{max} 、惯性权重 ω 、学习因子 c_1 和 c_2 。

2) 根据当前可控制变量计算模型适应度 F ，并与全局最优值 F_{best} 比较，然后更新个体最优值 P_{best} 和全局最优值 g_{best} 。

3) 更新粒子群的位移与速度，生成新一代粒子群，迭代次数 $k=k+1$ ，直到不平衡度满足式(11)或达到最大迭代次数时，结束寻优，输出最优解。否则返回步骤2)。

在2种调整模式中，柔性负荷响应模式的控制变量为连续型变量，粒子群算法采用正实数编

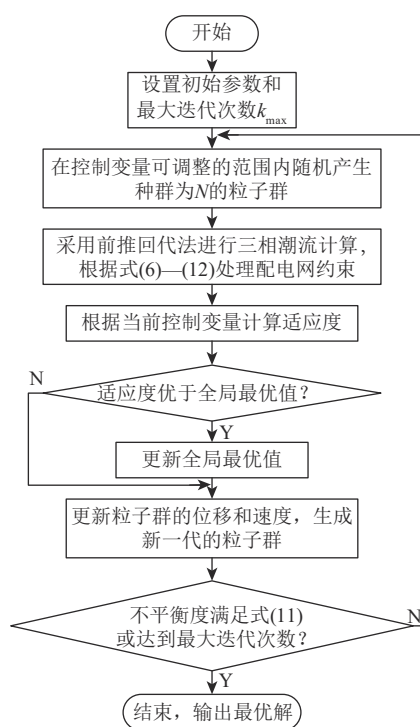


图2 粒子群算法流程图

Fig. 2 Flowchart of particle swarm optimization

码；光伏调节模式的控制变量是换相开关的动作状态，属于离散型变量，故采用二进制编码。在二进制粒子群算法中，粒子位置中的每一维变量都是二进制变量，而粒子速度则表示下一代粒子取0或1的概率。在光伏调节模式优化过程中，每一个光伏的换相开关接入状态可以用 $K_f=[S_A S_B S_C]^T$ 表示。其中， S_A 、 S_B 、 S_C 分别为A、B、C三相换相开关状态，取0时表示断开，取1时表示接入，对于每一个光伏换相开关均满足 $S_A+S_B+S_C=1$ 。

在图2中采用前推回代法进行计算时，为了满足实时性要求，同时考虑到配电台区的辐射状结构特点，本文采用了一种只需记录节点与支路关联关系而不需要重新编号的节点分层计算方法。

低压台区树状网络结构如图3所示，其中： T 为配电网的根节点； $C_u (u=1, 2, \dots, n)$ 表示配电台区的末端用户，定义为配电网的叶节点； $L_{\varphi_{vw}} (\varphi=A, B, C; v=1, 2, \dots, i; w=1, 2, \dots, k)$ 表示其他节点，定义为配电网的茎节点。从叶节点出发向上搜索，将同层节点存入相同数组，将根节点作为叶节点的上一节点。在潮流计算中，前推过程只需要从后往前获取并行处理，从而简化计算过程。

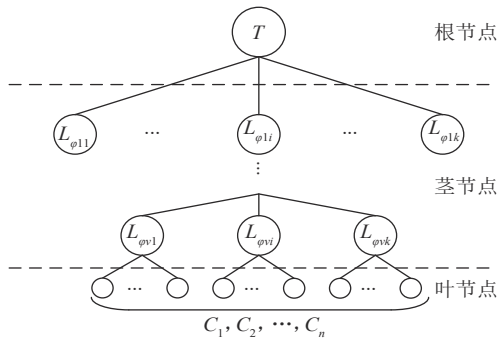


图3 低压配电台区树状网络结构图

Fig. 3 Tree network structure of low-voltage distribution station area

3 算例分析

采用华北某地区某馈线中某31节点低压台区为研究对象，该台区拓扑结构如图4所示。线路自阻抗 $Z_{gg}=0.443+j0.32$ ，单位为 Ω/km ，互阻抗 $Z_{gh}=0.01Z_{gg}$ ，每段线路长度均为30 m，对台区内线路及各元件搭建三相模型^[33]。其中，负荷和分布式光伏均采用恒功率模型。在节点5、8、12、

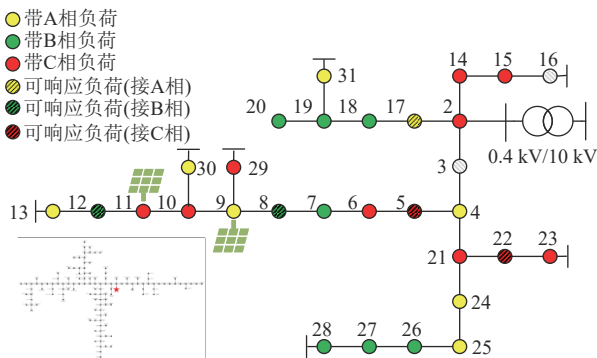


图4 31节点低压配电台区拓扑结构

Fig. 4 Topology of 31-node low-voltage distribution station area

17、22处装设有可参与响应的柔性负荷，额定功率分别为4.5、4.0、2.4、4.8、2.4 kW，而调节范围均为其额定功率的一半。柔性负荷补偿电价取平均水平0.45元/(kW·h)^[34-35]，最大电流三相不平衡度取25%^[36]。节点9和11处装设了单相光伏，并配置了换相开关，这些单相光伏的发电额定功率分别为3 kW($\cos\varphi=0.97$)和5 kW($\cos\varphi=0.98$)。光伏换相扰动补偿系数取值与柔性负荷补偿电价相同，为0.45元/(kW·h)，换相失败风险补偿系数取该地区高峰电价的3倍，为3.41元/(kW·h)，换相开关失败率取 10^{-4} 。由于该实际低压配电台区电力传输距离较短，光照强度、温度等条件相差不大，所以接入各节点的分布式光伏典型日发电标幺化功率曲线相同。负荷接入情况和负荷光伏出力曲线详见文献[37]。

考虑了不同天气情况对光伏出力的影响，采用本文提出的三相不平衡治理方法应用于该算例，计算结果如表1所示。采取单独的负荷响应模式、光伏调节模式和所提的联合调节模式对应的台区1 d内三相不平衡度变化情况如图5所示。

结合该台区三相不平衡度和治理结果进行分析，可知在晴天，单独采用负荷响应模式和光伏调节模式治理后，台区的最大三相电流不平衡度分别为51.35%、33.85%，均不符合国标要求。在阴天，分别采用以上2种模式单独治理后，台区的最大三相电流不平衡度分别为43.16%、32.98%。在负荷光伏联合调节模式治理下，晴天和阴天的台区最大三相电流不平衡度分别为25%和24.98%，2种工况均满足电网安全运行的要求。

表1 不同天气下各种模式治理效果

Tab. 1 Mitigation performance of different modes under different weather conditions

类型	治理方法	不平衡超限	不平衡度达标率/%	网损/(kW·h)	负荷调节成本/元	换相开关动作次数
晴天	初始状态	是	16.67	18.67	—	—
	负荷响应模式	是	70.83	17.34	15.17	—
	光伏调节模式	是	66.67	18.26	—	5
	联合调节模式	否	100	17.52	6.96	1
阴天	初始状态	是	16.67	19.44	—	—
	负荷响应模式	是	70.83	18.10	15.21	—
	光伏调节模式	是	33.33	17.27	—	6
	联合调节模式	否	100	18.36	10.01	1

注：“—”表示无此项。

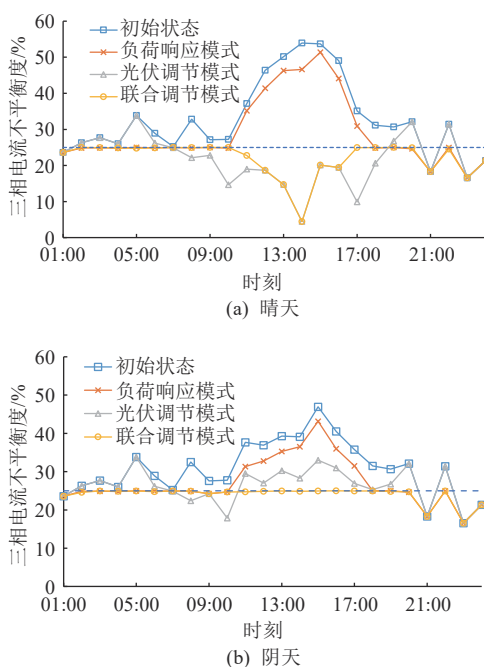


图5 台区1 d内三相不平衡度

Fig. 5 Three-phase imbalance levels within one day in distribution station area

在负荷响应模式下，考虑晴天和阴天2种情况。晴天时，最大三相电流不平衡度从53.95%治理到51.35%，1 d内的不平衡度达标率为70.83%，未达标时间段为11:00—19:00，网损为17.34 kW·h，柔性负荷调节成本为15.17元。与晴天相比，尽管阴天光伏出力的减少使台区三相电流不平衡度下降，但是在11:00—19:00，由于用户用电少，负荷调节能力有限，三相不平衡仍不能得到有效治理。阴天时，台区最大三相电流不平衡度从46.95%下降至43.16%，不平衡度达标率为70.83%，台区1 d网损为18.10 kW·h，柔性负荷调节成本为15.21元。

在光伏调节模式下，晴天时不平衡度达标率为66.67%，在07:00—18:00，台区不平衡情况均得到了有效治理，在不平衡最严重的14:00，三相电流不平衡度从53.95%下降至4.47%。在19:00—22:00、02:00—06:00，光伏不具备出力条件，无法治理三相不平衡。晴天时台区1 d网损为18.26 kW·h，换相开关动作5次，换相风险补偿成本为4.52元。阴天情况下，光伏发电量低，不平衡情况在11:00—18:00均未得到有效治理，不平衡度达标率为33.33%，与晴天的不平衡度达标率相比减少了一半。阴天时台区1 d网损17.27 kW·h，

换相开关动作6次，换相风险补偿成本为2.29元，由于换相开关动作次数频繁，换相风险补偿成本也较高。

负荷光伏联合调节模式下，晴天和阴天的不平衡度达标率均达到了100%，台区24 h内不平衡度均控制在国标限值以下，针对台区白天光伏出力和负荷接入不均衡以及晚上负荷接入引起的不平衡情况均得到了有效治理。晴天时，台区1 d网损为17.52 kW·h，柔性负荷调节成本为6.96元，换相开关动作1次，换相风险补偿成本为1.11元。阴天时台区1 d网损为18.36 kW·h，柔性负荷调节成本为10.01元，换相开关动作1次，换相风险补偿成本为0.42元。

从优化后的结果可以看出，仅采用负荷响应模式或仅采用光伏调节模式均不能有效治理台区典型日内的三相不平衡情况。而采用负荷光伏联合调节模式优化治理，解决了负荷响应模式下白天治理不充分以及光伏调节模式下晚上无法治理的问题，相对于初始状态下，晴天网损下降了6.16%，阴天网损下降了5.56%。与仅采用负荷响应模式相比，联合模式下柔性负荷调节成本在晴天时下降了54.12%，在阴天时下降了34.19%；与仅采用光伏调节模式相比，联合模式下光伏换相开关动作次数在晴天和阴天时均下降了83.33%。此外，与仅采用光伏调节模式相比，联合模式下光伏换相风险补偿成本在晴天时下降了75.44%，在阴天时下降了81.66%。本文算例选取的10 kV馈线下辖低压配电台区共47个，采用所提出的治理方法，不但可以解决三相不平衡问题，而且在晴天总计降低柔性负荷调节成本近385.87元/d，在阴天总计降低柔性负荷成本244.4元/d。

为了进一步分析柔性负荷响应模型中目标函数权重系数 w_1 和 w_2 对分析结果的影响，对晴天和阴天2种情况分别采用不同权重进行了治理，分析结果如表2所示，不同权重下台区的三相不平衡度情况如图6所示。

当 $w_1=0.9$ 、 $w_2=0.1$ 时，晴天和阴天的网损分别为15.47、16.19 kW·h，是所有方案中网损最小的；晴天和阴天的不平衡度平均值分别为25.88%和23.93%，也均为所有权重取值方法里的最小

表2 不同权重下的结果

Tab. 2 Results under different weights

类型	柔性负荷响应模型	不平衡度达标率/%	不平衡度平均值/%	不平衡度最大越限值	网损/(kW·h)	柔性负荷调节成本/元
晴天	初始状态	16.67	32.74	53.95	18.67	—
	$w_1=0.9$	70.83	25.88	46.79	15.47	38.28
	$w_1=0.7$	70.83	28.76	48.44	17.17	17.47
	$w_1=0.5$	70.83	29.13	49.35	17.34	15.17
	$w_1=0.3$	70.83	29.44	51.71	17.47	13.20
	$w_1=0.1$	66.67	30.12	52.47	17.54	13.16
阴天	初始状态	16.67	30.73	46.95	19.44	—
	$w_1=0.9$	70.83	23.93	41.32	16.19	37.24
	$w_1=0.7$	70.83	26.84	42.81	17.84	17.95
	$w_1=0.5$	70.83	27.05	43.16	18.10	15.21
	$w_1=0.3$	70.83	27.62	44.63	18.22	14.13
	$w_1=0.1$	66.67	28.05	45.91	18.36	12.01

注：“—”表示无此项。

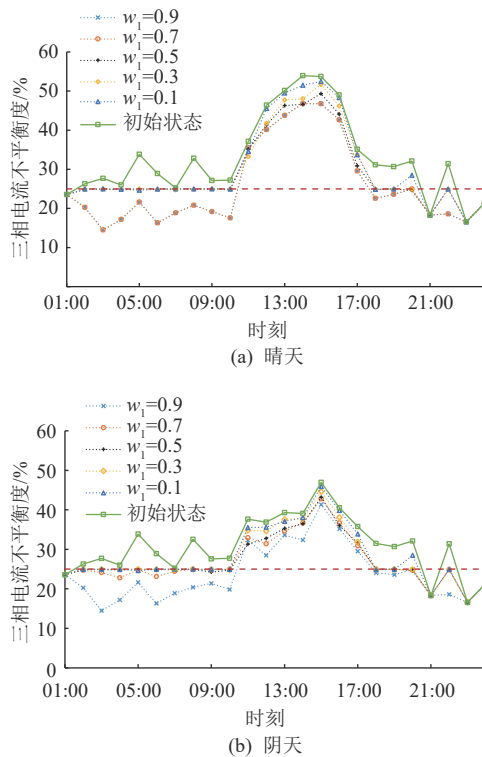


图6 不同权重下的三相不平衡度

Fig. 6 Three-phase imbalance levels under different weights

值，且结合图6可以看到，在00:00—11:00，不平衡度比其他权重取值方法更小。在此情况下，晴天和阴天的不平衡达标率均为70.83%，与 w_1 取值0.7、0.5、0.3的不平衡达标率相同。但此时柔性负荷调节成本过高，与其他权重取值方法的最大成本相比，晴天时增加了119.12%，阴天时增加了107.47%。

当 $w_1=0.1$ 、 $w_2=0.9$ 时，晴天和阴天的柔性负荷调节成本均最小，且不平衡达标率为66.67%，比 w_1 取值0.9、0.7、0.5、0.3时都低，但网损、不平衡平均值、不平衡度最大越限值均最大，表明治理效果不如其他取值方法。

当 w_1 取值0.7、0.5、0.3时，不平衡达标率均为70.83%。在此情况下，晴天和阴天的不平衡度平均值的标准差分别为0.27%、0.33%，不平衡度最大越限值的标准差分别为1.38%、0.79%，网损的标准差分别为0.12、0.16 kW·h，不平衡度平均值、不平衡度最大越限值和网损随着 w_1 的减小而缓慢增加；晴天和阴天的负荷调节成本的标准差分别为1.74元、1.61元，负荷调节成本随着 w_1 的减小而缓慢减少。分析方差结果可知，3种权重取值方法治理后的结果差距不大，所以权重系数 w_1 取值范围在0.3~0.7较为合理。

4 结论

针对分布式光伏接入低压配电网使三相不平衡治理变得更复杂这一问题，提出了一种考虑柔性负荷响应和光伏调节联合调节的低压配电网三相不平衡治理方法，并通过算例验证了治理方法的有效性。通过算例分析可以发现：

- 1) 所提出的方法能有效治理不同天气下配电网的三相不平衡越限问题。
- 2) 在三相不平衡得到有效治理的前提下，晴

天时换相开关的动作次数减少了83.33%，换相风险补偿成本减少了75.44%，负荷调节成本下降了54.12%；阴天时换相开关的动作次数减少了83.33%，换相风险补偿成本减少了81.66%，负荷调节成本下降了34.19%。

3) 柔性负荷响应模型目标函数中权重系数 w_1 的取值为0.3~0.7时，治理效果最好，柔性负荷调节成本最低。

参考文献

- [1] 刘哲, 唐成鹏, 周青, 等. 新型电力系统建设环境下的“西电东送”发展研究[J]. 广东电力, 2023, 36(9): 26-33.
LIU Z, TANG C P, ZHOU Q, et al. Research on development of west-to-east power transmission under the environment of new power system construction[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(9): 26-33.
- [2] 苏步芸, 王诗超. 新型电力系统背景下新能源送出合理消纳率研究[J]. 南方能源建设, 2023, 10(6): 43-50.
SU B Y, WANG S C. Research on reasonable consumption rate of new energy transmission under the new power system[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(6): 43-50.
- [3] 马晓伟, 王文倬, 薛晨, 等. 西北新型电力系统先行示范体系探究[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 1-7.
MA X W, WANG W Z, XUE C, et al. Research on the leading demonstration system of new-type power system in northwest China[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 1-7.
- [4] 员江洋, 刘宁宁, 杨明, 等. 山东电网新能源消纳关键措施分析及综合评估[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(6): 567-576.
YUN J Y, LIU N N, YANG M, et al. Comprehensive assessment and analytics for renewable energy accommodation key factors of Shandong power grid[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(6): 567-576.
- [5] 吴珊, 边晓燕, 张菁娴, 等. 面向新型电力系统灵活性提升的国内外辅助服务市场研究综述[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1662-1677.
WU S, BIAN X Y, ZHANG J X, et al. A review of domestic and foreign ancillary services market for improving flexibility of new power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1662-1677.
- [6] 张勇军, 羿应棋, 李立涅, 等. 双碳目标驱动的新型低压配电系统技术展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 1-12.
ZHANG Y J, YI Y Q, LI L C, et al. Prospect of new low-voltage distribution system technology driven by carbon emission peak and carbon neutrality targets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 1-12.
- [7] 黄超, 卜思齐, 陈麒宇, 等. 元电力: 新一代智能电网[J]. 发电技术, 2022, 43(2): 287-304.
HUANG C, BU S Q, CHEN Q Y, et al. Meta-power: next-generation smart grid[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 287-304.
- [8] 刘建伟, 李学斌, 刘晓鸥. 有源配电网中分布式电源接入与储能配置[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 476-484.
LIU J W, LI X B, LIU X O. Distributed power access and energy storage configuration in active distribution network[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 476-484.
- [9] MA K, FANG L R, KONG W W. Review of distribution network phase unbalance: Scale, causes, consequences, solutions, and future research directions[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(3): 479-488.
- [10] 郑在涛, 叶保璇, 钟康骅, 等. 基于预测滚动的有源低压配电网三相不平衡治理方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1): 29-36.
ZHENG Z T, YE B X, ZHONG K H, et al. A predictive rolling-based three-phase unbalance management method of low-voltage active distribution network[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 29-36.
- [11] 丁石川, 崔康, 杭俊, 等. 基于改进NSGA-3和平衡潮流的配电网相序优化[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 46-55.
DING S C, CUI K, HANG J, et al. Phase sequence optimization of a distribution network based on improved NSGA-3 and unbalanced power flow[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 46-55.
- [12] 陈申宇, 陈维, 刘起蕊, 等. 基于序优化的配电网负荷三相不平衡优化策略研究[J]. 智慧电力, 2024, 52(3): 102-109.
CHEN S Y, CHEN W, LIU Q R, et al. Three-phase unbalance optimization strategy for distribution network load based on order optimization algorithm[J]. Smart Power, 2024, 52(3): 102-109.
- [13] 魏剑啸, 粟忠来, 杨波, 等. 配电台区无功功率及三相不平衡电容调节的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 46-55.

- 2019, 47(16): 71-79.
- WEI J X, SU Z L, YANG B, et al. Study on reactive power and three-phase unbalance regulated by capacitor in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 71-79.
- [14] 陶顺, 孙志鹏. 三相不平衡条件下有载调容变压器经济调容方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(9): 151-156.
- TAO S, SUN Z P. Economic capacity regulation method of on-load capacity regulating transformer under three-phase imbalance conditions[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(9): 151-156.
- [15] 童方格, 谭阳红, 罗春辉. 基于融合熵时段划分的三相配电网动态重构[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 78-84.
- TONG F G, TAN Y H, LUO C H. Dynamic reconstruction of three-phase distribution network based on time division of fusion entropy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 78-84.
- [16] 吉兴全, 连承宇, 张玉敏, 等. 基于智能软开关的三相不平衡配电网动态重构策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(5): 111-118.
- JI X Q, LIAN C Y, ZHANG Y M, et al. Dynamic reconfiguration of three-phase unbalanced distribution networks based on SOP[J]. Smart Power, 2023, 51(5): 111-118.
- [17] 赵晋泉, 刘绪, 林昌年, 等. 单相光伏大量接入的三相不平衡配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 13-18.
- ZHAO J Q, LIU X, LIN C N, et al. Three-phase unbalanced reactive power optimization for distribution systems with a large number of single phase solar generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 13-18.
- [18] 王二威, 秦亮, 皇甫成, 等. 基于空间分布和时序特征的配电网台区三相不平衡调整方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(19): 97-105.
- WANG E W, QIN L, HUANGFU C, et al. Three-phase unbalance adjustment method for distribution station areas based on spatial distribution and time-series characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 97-105.
- [19] LIU S Y, CUI X Y, LIN Z Z, et al. Practical method for mitigating three-phase unbalance based on data-driven user phase identification[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 1653-1656.
- [20] 马志斌, 侯哲帆, 张瑞雪. 基于智能终端和换相开关的台区三相不平衡治理方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(6): 39-48.
- MA Z B, HOU Z F, ZHANG R X. Research on the three-phase unbalance control method in the transformer area based on intelligent terminal equipment and commutation switch[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6): 39-48.
- [21] 程湘, 田昊, 周群, 等. 考虑相位不平衡的智能换相开关控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 48-55.
- CHENG X, TIAN H, ZHOU Q, et al. Control strategy of intelligent commutation switch considering phase imbalance[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 48-55.
- [22] LIU S Y, LIN Z Z, LI J Q, et al. Bi-level optimal placement model of phase switch devices for mitigating three-phase unbalance in low-voltage areas[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4): 3149-3152.
- [23] 侯美倩, 牛启帆, 邢洁, 等. 计及可靠性的含源配电网储能系统的优化配置[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(2): 504-514.
- HOU M Q, NIU Q F, XING J, et al. Optimal configuration of energy storage system in active distribution network with the consideration of reliability[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(2): 504-514.
- [24] 杨锡勇, 张仰飞, 林纲, 等. 考虑需求响应的源-荷-储多时间尺度协同优化调度策略[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 253-260.
- YANG X Y, ZHANG Y F, LIN G, et al. Multi-time scale collaborative optimal scheduling strategy for source-load-storage considering demand response[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(2): 253-260.
- [25] 雷旭, 马鹏飞, 宋智帅, 等. 计及风电预测误差的柔性负荷日内调度模型[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 485-491.
- LEI X, MA P F, SONG Z S, et al. A flexible intraday load dispatch model considering wind power prediction errors[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 485-491.
- [26] 刘永梅, 王金丽, 杨红磊, 等. 计及柔性负荷调节能力的有源配电网动态优化方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 73-80.
- LIU Y M, WANG J L, YANG H L, et al. Dynamic optimal method of distribution network in consideration of flexible load adjustment capability[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 73-80.
- [27] NEJABATKHAH F, LI Y W. Flexible unbalanced compensation of three-phase distribution system using single-phase distributed generation inverters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1845-1857.
- [28] 唐巍, 李天锐, 张璐, 等. 基于三相四线制最优潮流的低压配电网光伏-储能协同控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 31-40.

- TANG W, LI T R, ZHANG L, et al. Coordinated control of photovoltaic and energy storage system in low-voltage distribution networks based on three-phase four-wire optimal power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 31-40.
- [29] 陈家超, 李钦豪, 唐渊, 等. 考虑光伏选相投切的低压配电网三相平衡优化[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(4): 71-78.
- CHEN J C, LI Q H, TANG Y, et al. Three-phase balance optimization of low-voltage distribution network considering photovoltaic phase selection and switching[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 71-78.
- [30] 姚伟, 刘彦彦, 张玉良. 基于序电流的三相负荷不平衡度数学建模与度量分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 34-42.
- YAO W, LIU Y Y, ZHANG Y L. Mathematical modeling and measurement analysis of three-phase load imbalance degree based on sequence current[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 34-42.
- [31] 周纲, 黄瑞, 刘谋海, 等. 基于新型B-N窗和改进分区法的三相不平衡度检测[J]. 电测与仪表, 2023, 60(10): 117-123.
- ZHOU G, HUANG R, LIU M H, et al. Three-phase imbalance factor detection based on novel B-N window and improved partition method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10): 117-123.
- [32] 陈家超. 低压有源配电网的协调控制优化模型与方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- CHEN J C. Research on coordinated control optimization model and method of low-voltage active distribution network. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [33] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2014: 12-20.
- WANG S X, WANG C S. Analysis of modern distribution system[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2014: 12-20.
- [34] 颜湘武, 王庆澳, 卢俊达, 等. 计及电动汽车和柔性负荷的微电网能量调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 69-79.
- YAN X W, WANG Q A, LU J D, et al. Microgrid energy scheduling with electric vehicles and flexible loads[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(17): 69-79.
- [35] 刘蓉晖, 李子林, 杨秀, 等. 考虑用户侧柔性负荷的社区综合能源系统日前优化调度[J]. 太阳能学报, 2019, 40(10): 2842-2850.
- LIU R H, LI Z L, YANG X, et al. Optimal dispatch of community integrated energy system considering user-side flexible load[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2019, 40(10): 2842-2850.
- [36] 国家电网公司. 配电网运维规程: Q/GDW 1519—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- State Grid Corporation of China. Regulations of operating and maintenance for distribution network: Q/GDW 1519—2014[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [37] 顾怡, 邢洁, 马洪艳, 等. 计及配网电压越限的光储协同优化运行策略[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(3): 893-902.
- GU Y, XING J, MA H Y, et al. Optimal operation strategy of distributed photovoltaic and energy storage systems by considering voltage violations in the distribution network[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(3): 893-902.

收稿日期: 2024-06-09。

修回日期: 2024-09-03。

作者简介:



高杉

高杉(2000), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统中新能源、储能系统的运行优化, 2221955@mail.dhu.edu.cn;



邢洁

邢洁(1981), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为新能源接入电网的运行规划、储能系统及智能电网等, 本文通信作者, xingj@dhu.edu.cn;



单英浩

单英浩(1991), 男, 博士, 副教授, 主要从事智能电网、预测控制和智能算法等相关研究, shanyh@dhu.edu.cn;



顾怡

顾怡(1999), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统中新能源、储能系统的运行优化, 2221941@mail.dhu.edu.cn。

(责任编辑 苗雪连)