

考虑光伏选相投切的低压配电网三相平衡优化

陈家超,李钦豪,唐 渊,张勇军

(华南理工大学 电力学院 智慧能源工程技术研究中心,广东 广州 510640)

摘要:单相光伏电源的接入通常会引起低压配电网(LVDN)的三相不平衡度增大。针对当前负荷换相困难以及光伏协调控制在三相四线制LVDN中的适用性问题,提出了LVDN三相平衡优化模型。基于三相四线制系统的节点导纳矩阵,以注入电流不平衡量建立LVDN的潮流方程,以三相不平衡度最小为目标,建立考虑光伏选相投切、光伏逆变器无功调节和储能有功调节的三相平衡协调优化控制模型;采用区间约束描述光伏出力的不确定性,连续化逻辑变量以降低三相四线制LVDN模型的求解难度。采用通用代数建模系统进行建模仿真并求解,仿真结果表明所提优化方法能有效降低LVDN的三相不平衡度以及网损。

关键词:分布式光伏;选相;三相不平衡;低压配电网;三相四线制

中图分类号:TM 71;TM 615

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202201005

0 引言

我国低压配电网LVDN(Low-Voltage Distribution Network)采用三相四线制的接线方式,由于LVDN管理不完善以及缺少前瞻性规划,存在参数不对称、负荷三相不平衡等问题^[1]。随着人们生活水平的提高,负荷需求逐渐增长,同时单相分布式光伏的广泛接入,进一步地加剧了LVDN的三相不平衡度,给配电网的电压质量和线损管理带来了诸多挑战,甚至影响到LVDN的运行安全性。若能通过单相光伏的选相柔性并网,同时考虑其逆变器的无功调节能力,则会提升LVDN的电能质量,改善三相不平衡度^[2]。

目前,国内外学者针对LVDN的三相不平衡优化问题进行了大量的研究,相应的措施可分为2类。一类措施是负荷侧控制,通过算法进行相序分配并结合换相装置进行换相,实现负荷的均匀分布。文献[3]在负荷侧接入自动换相装置,以最小化换相次数和三相不平衡度为目标,构建了负荷相序分配优化模型;文献[4]设计了一种电动汽车充电机选线装置,将电动汽车负荷均匀分配给各相电源以实现三相负荷平衡;文献[5]通过定时对线路电流进行采样,基于协调优化算法对负荷相序进行切换,以此实现配电网三相平衡;文献[6]以换相装置开关切换次数最少为目标函数,通过优化算法求解得到了配电台区负荷三相不平衡的实时控制策略。然而低压台区的负荷众多,负荷换相一方面需要采用较多的换相开关,投资大;另一方面,换相过程难免产生电压闪变问题,换相失败也将造成负荷停电,对用户设备

和用电体验有负面的影响。另一类措施是系统侧控制,主要通过有载调压变压器的调节^[7]、负荷重构^[8]、光伏逆变器的无功控制^[9]等方法,对LVDN进行协调控制。文献[10]以最小化配电网的负序电压和网损为目标,以有载调压变压器、静止无功补偿装置为调控手段,构建了一种三相不平衡无功优化模型;文献[11]提出了利用分布式电源逆变器的无功调节能力进行电压调节,以最小化三相不平衡度。然而,已有研究大多基于三相三线制开展,对于三相四线制线路而言,存在适用性问题^[12]。为此,文献[13]考虑网损和三相不平衡度最小,基于三相四线制最优潮流,建立了考虑储能有功调节和光伏逆变器无功调节的协同控制模型,但没有考虑分布式光伏出力的随机性。

总体而言,单相分布式电源的接入往往会加重LVDN的三相不平衡度,而目前关于三相平衡优化的研究未能充分考虑LVDN的接线方式以及分布式电源的主动控制能力,而负荷侧控制又存在难以推广的问题。而对光伏采用换相技术,将进一步丰富配电网的调控手段,有利于改善配电网的电能质量^[14],减少三相平衡装置的投资,同时避免用户负荷换相带来的不利影响。基于此,本文首先从机理上分析了光伏及其逆变器的无功调节对LVDN电压调节的积极作用,同时探讨了光伏并网选相投切的基本流程及实施可行性;进一步地,重点考虑光伏选相并网和无功调节能力,以及储能配置对LVDN三相电压平衡调节能力的提升作用,构建了含光储的LVDN三相平衡优化模型;最后,通过仿真算例验证了所提模型的有效性。

1 光伏调节控制能力及选相并网建模

1.1 光伏特性及其无功调节能力

光伏发电系统将太阳辐射能量直接转换成直流

收稿日期:2021-02-26;修回日期:2021-10-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777077);广州市科技计划项目(202102021208)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777077) and Guangzhou Science and Technology Plan Program(202102021208)

电能,主要由太阳能电池方阵、逆变器两部分组成^[15]。由于光伏出力特性主要与光照强度、温度相关,其出力上限由光照强度等因素决定,具有不确定性。鉴于光伏逆变器主电路的拓扑结构和静止无功发生器具有一致性,基于正弦脉宽调制(SPWM)等控制策略可实现光伏无功、有功的解耦控制,进而实现将光伏发电的直流电逆变成交流电并网的同时对配电网进行无功调节^[16-17],进一步提高配电网的可控性。

在实际工程项目中,光伏项目建设留有足够的裕度,故光伏逆变器容量会大于光伏的最大出力,因此光伏逆变器的无功调节能力不可忽视。图1给出了光伏逆变器的有功-无功出力曲线。图中:有功出力 P_{PV} 、无功出力 Q_{PV} 、光伏逆变器容量 S_N 满足约束条件 $P_{PV}^2 + Q_{PV}^2 \leq S_N^2$; P_N^{PV} 为光伏并网额定有功功率,此时光伏逆变器对应的最大无功输出功率为 $\pm Q_{max}^{PV}$ 。当光伏出力降低时,LVDN电压水平会相应降低,而逆变器的无功调节能力因光伏有功出力的降低而有所提升,故可根据需求进行无功补偿以支撑电压水平。

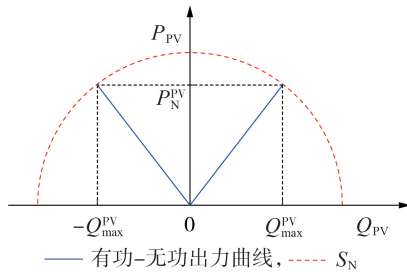


图1 光伏逆变器的有功-无功出力曲线

Fig.1 Active-reactive power output curve of photovoltaic inverter

1.2 光伏选相并网系统

当LVDN存在单相光伏并网时,若有选相控制系统,则可通过其调控手段为负荷均衡提供一定的积极作用。目前,调整并网相序的方法主要包括人工现场调整相序和智能设备自动换相这2种^[18]。人工现场调整相序是由相应人员根据试错法或者相关优化算法对台区内负荷的接入相序进行手动调整;而智能设备自动换相是由智能换相装置通过换相控制装置接收由优化算法得到的最佳换相策略,并传输到换相执行终端进行自动换相。

对于光伏选相系统而言,其换相的具体流程为:在接收到换相指令后,光伏逆变器耦合结构的继电器进行动作,由原有馈线切换到另一相的馈线上;同时,逆变器控制系统测量所切换的另一相馈线的潮流信息(如输出电压的幅值、相位),并以此作为控制指令发出,使逆变器原有输出电压的幅值、相位与需切换的另一相相同;在控制效果达到要求后,实现换相。为了保证LVDN的运行稳定性、可靠性,逆变器控制系统完成功率潮流调整的时间应与继电器的换

相动作时间相等。参与换相的逆变器结构见图2。

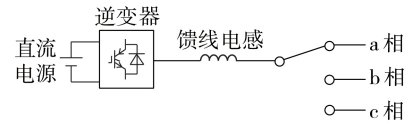


图2 光伏选相装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of photovoltaic phase selection device

光伏选相装置为电网结构的进一步优化提供了技术基础,光伏的有功输出可以削减线路的峰值负荷,光伏逆变器的无功输出也可改善线路的电压水平并降低网损。目前,大部分低压台区已实现三相四线制入户方式,使单相光伏的选相接入成为可能。随着光伏渗透率的提高,对达到一定容量的光伏进行选相投切,可以有效降低LVDN的三相不平衡度。

2 含光储的三相四线制LVDN网络方程

2.1 LVDN 三线四线制电网结构

在以往的三相潮流计算中,通常忽略接地阻抗的影响,将中性点视为与大地等电位,基于Kron原理对中性线阻抗进行折算,忽略了中性点电压。然而,在实际电网中,理想的金属接地并不存在,中性点电压是一个非零待求变量。为了实现精细化的潮流计算,本文搭建了基于三相四线制框架的支路模型和端点模型分别见附录A图A1和图A2。将处于同一端不同相的节点统称为1个端点,1个端点处最少包含2个节点,最多包含4个节点。各相线路存在自阻抗以及表征各相线路之间耦合关系的互阻抗,负荷接于三相线路与中性线之间,形成闭合回路。

2.2 线路模型

取消中性点理想接地后的线路模型如附录A图A3所示。基于电路的基本定律,可求得端点 F 和端点 T 侧注入电流向量的串联阻抗电流分量、并联电纳电流分量、注入电流向量,分别如式(1)~(3)所示。联立式(1)~(3)可得节点导纳矩阵 Y ,其元素 Y_{FF} 、 Y_{TT} 、 Y_{FT} 、 Y_{TF} 如式(4)所示。

$$I_{L, abcn} = Z_{abcn}^{-1} (U_{F, abcn} - U_{T, abcn}) \quad (1)$$

$$I_{FB, abcn} = j \frac{B_{abcn}}{2} U_{F, abcn}, I_{TB, abcn} = j \frac{B_{abcn}}{2} U_{T, abcn} \quad (2)$$

$$I_{F, abcn} = I_{L, abcn} + I_{FB, abcn}, I_{T, abcn} = -I_{L, abcn} + I_{TB, abcn} \quad (3)$$

$$Y_{FF} = Y_{TT} = Z_{abcn}^{-1} + j \frac{B_{abcn}}{2}, Y_{FT} = Y_{TF} = -Z_{abcn}^{-1} \quad (4)$$

式中: $I_{L, abcn}$ 为端点 F 和端点 T 侧注入电流向量的串联阻抗电流分量; $I_{FB, abcn}$ 、 $I_{TB, abcn}$ 分别为端点 F 、 T 侧注入电流向量的并联电纳电流分量; $I_{F, abcn}$ 、 $I_{T, abcn}$ 分别为端点 F 、 T 侧的注入电流向量; Z_{abcn} 为线路串联阻抗矩阵; B_{abcn} 为线路并联电纳矩阵; $U_{F, abcn}$ 、 $U_{T, abcn}$ 分别为端点 F 、 T 侧的节点电压向量。

2.3 负荷和分布式电源模型

负荷和分布式电源采用恒功率模型。为了确定节点注入电流与节点电压的关系,规定以注入电流方向为参考方向,负荷和分布式电源模型见附录A图A2,各相注入电流可根据式(5)和式(6)得到。

对于D型端点元件而言,有:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a-b} \\ I_{b-c} \\ I_{c-a} \end{bmatrix} \quad (5)$$

对于Y/YN型端点元件而言,有:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a-n} \\ I_{b-n} \\ I_{c-n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: I_a 、 I_b 、 I_c 、 I_n 为注入网络的电流; I_{a-b} 、 I_{b-c} 、 I_{c-a} 为D型端点元件电流; I_{a-n} 、 I_{b-n} 、 I_{c-n} 为Y/YN型端点元件电流。

对于负荷而言,其有功功率与无功功率为已知变量,元件电流 I_{x-y} 可根据式(7)计算得到。

$$I_{x-y} = \frac{(P_x U_{x-y}^{\text{Re}} + Q_x U_{x-y}^{\text{Im}}) - j(Q_x U_{x-y}^{\text{Re}} - P_x U_{x-y}^{\text{Im}})}{(U_{x-y}^{\text{Re}})^2 + (U_{x-y}^{\text{Im}})^2} \quad (7)$$

式中: P_x 、 Q_x 分别为负荷元件 x 端和 y 端之间的有功功率、无功功率; U_{x-y}^{Re} 、 U_{x-y}^{Im} 分别为负荷元件 x 端和 y 端之间电压的实部、虚部。

PQ型分布式电源元件电流也可以根据式(7)计算得到,不同之处在于:其功率方向为正,即 P_x 和 Q_x 取正值,而负荷的 P_x 和 Q_x 取负值。

2.4 储能模型

储能系统以附录A图A2中YN型端点模型接入LVDN,储能可以以单相、三相接入于接入相和中性线之间,形成闭合回路。三相接入时,考虑储能可三相独立调节,具体调节方式为:可以选择接入某一相进行充放电,但不可以同时选择接入两相、三相进行充放电。本文在LVDN协调优化的研究中主要针对以蓄电池为对象的储能系统,其对外的功率传输特性由相应的参数——荷电状态SOC(State Of Charge)以及充放电功率进行描述。SOC表征了蓄电池的剩余容量状态,其定义为剩余容量与额定容量的比值,得到蓄电池的SOC是对其实现协调控制的前提。

充电时蓄电池的SOC可表示为:

$$\delta_{\text{SOC},t} = \delta_{\text{SOC},t-1} + \eta_{\text{ch},t} P_{\text{ch},t} \Delta t / E_s \quad (8)$$

放电时蓄电池的SOC可表示为:

$$\delta_{\text{SOC},t} = \delta_{\text{SOC},t-1} - P_{\text{dis},t} \Delta t / (\eta_{\text{dis},t} E_s) \quad (9)$$

式中: $\delta_{\text{SOC},t}$ 、 $\delta_{\text{SOC},t-1}$ 分别为 t 、 $t-1$ 时段蓄电池的SOC; E_s 为蓄电池的额定容量; $\eta_{\text{ch},t}$ 、 $\eta_{\text{dis},t}$ 分别为 t 时段蓄电池的充、放电效率; $P_{\text{ch},t}$ 、 $P_{\text{dis},t}$ 分别为 t 时段蓄电池的

充、放电功率; Δt 为单位时段时长。

2.5 光伏逆变器模型

实际运行过程中光伏逆变器的容量大于光伏出力,因此可利用光伏逆变器进行电压调节,当线路出现过电压时吸收无功以降低电压,当线路出现欠电压时发出无功以支撑电压。光伏逆变器的最大无功输出功率 $Q_{\text{PV}}^{\text{max}}$ 的计算式为:

$$Q_{\text{PV}}^{\text{max}} = \sqrt{S_N^2 - P_{\text{PV}}^2} \quad (10)$$

2.6 三相四线制LVDN的潮流方程

基于电路理论,各节点注入电流可由式(11)所示节点电压方程计算得到,也可由式(7)所示负荷元件模型计算得到。据此可得到基于注入电流不平衡量的潮流方程如式(12)所示。

$$I_{Y,t} = Y U_t \quad (11)$$

$$\Delta I = I_Y - I_S = 0 \quad (12)$$

式中: $I_{Y,t}$ 、 U_t 分别为 t 时段LVDN中所有节点的节点注入电流向量、节点电压向量; ΔI 为注入电流不平衡量; I_Y 为基于节点电压方程计算得到的电流向量; I_S 为基于负荷元件模型计算得到的电流向量。

3 LVDN的三相平衡优化模型

3.1 目标函数

三相不平衡对配电网安全性的影响主要在于造成节点电压发生偏移甚至越限。三相传输功率的不平衡会导致某些相线传输的功率过高,进而导致该相线的电压水平偏低,而其他相线传输的功率过少,进而导致该相线的电压水平偏高。特别是随着单相分布式电源的接入,进一步增大了三相不平衡度。基于此,本文优化以三相不平衡度为关键考察指标,同时考虑分布式光伏的消纳,目标函数 f_A 见式(13)。

$$\min f_A = F_d + \sum_t \varphi (P_{\text{PV}1,t}^* - P_{\text{PV}0,t}) \quad (13)$$

$$F_d = \sum_t \sum_m U_{\text{VUF},m,t} \quad (14)$$

$$U_{\text{VUF},m,t} = \left| \frac{V_{\text{neg},m,t}}{V_{\text{pos},m,t}} \right| = \left| \frac{V_{a,m,t} + \alpha^2 V_{b,m,t} + \alpha V_{c,m,t}}{V_{a,m,t} + \alpha V_{b,m,t} + \alpha^2 V_{c,m,t}} \right| \quad (15)$$

式中: F_d 为LVDN的三相不平衡度,以关键节点电压的三相不平衡度之和进行计算; $P_{\text{PV}0,t}$ 为 t 时段光伏出力的调度值;由于光伏出力预测值具有不确定性,本文用区间数的形式 $P_{\text{PV}1,t}^*$ 表示 t 时段光伏出力的预测值,即 $P_{\text{PV}1,t}^* = [P_{\text{PV}1,\text{dn},t}, P_{\text{PV}1,\text{up},t}]$, $P_{\text{PV}1,\text{dn},t}$ 、 $P_{\text{PV}1,\text{up},t}$ 分别为 t 时段光伏出力预测值的最小、最大值; φ 为弃光惩罚项,引入弃光惩罚项是为了使系统尽可能地全额消纳光伏; $U_{\text{VUF},m,t}$ 为 t 时段节点 m 的三相不平衡度; $V_{\text{neg},m,t}$ 、 $V_{\text{pos},m,t}$ 分别为 t 时段节点 m 的负序、正序电压; $V_{a,m,t}$ 、 $V_{b,m,t}$ 、 $V_{c,m,t}$ 为 t 时段节点 m 的三相电压; $\alpha = 1 \angle 120^\circ$ 。

3.2 约束条件

1) 光伏分相控制及其逆变器调节约束。

在工程计算中, t 时段光伏出力的预测值 $P_{PV,t}$ 与太阳辐射强度之间存在较强的正比关系, 当太阳辐射强度低于额定光照强度时, 光伏出力随太阳辐射强度的增加而增加; 当太阳辐射强度大于等于额定光照强度时, 光伏出力达到最大值。

结合对太阳辐射强度的预测值, t 时段光伏出力的预测值 $P_{PV,t}$ 可近似表示为:

$$P_{PV,t} = \begin{cases} P_{PV_rated} \gamma_{PV,t} / \gamma_{PV_rated} & 0 \leq \gamma_{PV,t} \leq \gamma_{PV_rated} \\ P_{PV_rated} & \gamma_{PV,t} \geq \gamma_{PV_rated} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\gamma_{PV,t}$ 为 t 时段的太阳辐射强度; γ_{PV_rated} 为额定光照强度; P_{PV_rated} 为光伏面板的额定输出功率。

考虑到太阳辐射强度受太阳位置和天气变化等因素影响, 本文采用区间数对该参数的不确定性进行处理, 将太阳辐射强度预测的区间上、下限代入式(16), 获得光伏预测出力区间数 $P_{PV,t}^* = [P_{PV_dn,t}, P_{PV_up,t}]$ 。考虑到光伏出力调度值受其预测出力的影响, 有如下约束:

$$0 \leq P_{PV0,t} \leq P_{PV,t}^* = [P_{PV_dn,t}, P_{PV_up,t}] \quad (17)$$

为了描述光伏选相并网, 本文引入逻辑变量 $\lambda_{\varphi,t}$ ($\varphi \in \{a, b, c\}$) 描述光伏并网的选相控制, 当其值为1时, 表示光伏选择 φ 相并网, 故有如下约束:

$$P_{PV,\varphi,t} = \lambda_{\varphi,t} P_{PV0,t}, \quad \sum_{\varphi \in \{a, b, c\}} \lambda_{\varphi,t} = 1 \quad (18)$$

式中: $P_{PV,\varphi,t}$ 为 t 时段 φ 相光伏并网有功出力。

另一方面, 光伏逆变器可参与 LVDN 的无功调节。光伏逆变器的无功调节能力受其额定容量和光伏有功出力的影响, 结合光伏选相并网的有功出力 $P_{PV,\varphi,t}$, 光伏逆变器的无功出力及其约束条件为:

$$-Q_{PV_max,\varphi,t}^{PV} \leq Q_{PV,\varphi,t} \leq Q_{PV_max,\varphi,t}^{PV} \quad (19)$$

$$Q_{PV_max,\varphi,t}^{PV} = \lambda_{\varphi,t} \sqrt{S_N^2 - P_{PV,\varphi,t}^2} \quad (20)$$

式中: $Q_{PV,\varphi,t}^{PV}$ 、 $Q_{PV_max,\varphi,t}^{PV}$ 分别为 t 时段 φ 相光伏逆变器的无功出力及其最大值。

2) 蓄电池储能设备的运行约束。

对于蓄电池储能设备而言, 其在 t 时段的能量与在该时段的充/放电功率及在前一时段的能量有关, 具体可表示为:

$$E_{ess,t} = E_{ess,t-1} + \sum_{\varphi \in \{a, b, c\}} (\eta_{ch,t} P_{ch,\varphi,t} \Delta t - P_{dis,\varphi,t} \Delta t / \eta_{dis,t}) \quad (21)$$

式中: $E_{ess,t}$ 、 $E_{ess,t-1}$ 分别为 t 、 $t-1$ 时段蓄电池的能量; $P_{ch,\varphi,t}$ 、 $P_{dis,\varphi,t}$ 分别为 t 时段 φ 相蓄电池的充、放电功率。由于蓄电池的充、放电不能同时进行且存储能力有限, 则有:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ch,\varphi,t} \leq \delta_{\varphi,t} P_{ch,max}, & 0 \leq P_{dis,\varphi,t} \leq (1 - \delta_{\varphi,t}) P_{dis,max} \\ 0 \leq E_{ess,t} \leq E_s, & \sum_{\varphi \in \{a, b, c\}} \delta_{\varphi,t} = 1 \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_{ch,max}$ 、 $P_{dis,max}$ 分别为蓄电池的最大充、放电功率; $\delta_{\varphi,t}$ 为 t 时段 φ 相蓄电池的充放电逻辑变量, 充电时取值为1, 放电时取值为0。

考虑到当前蓄电池储能的主要作用是平抑可再生能源的波动性, 尽可能全额消纳可再生能源发电, 因此还需满足如下约束:

$$0 \leq P_{ch,\varphi,t} \leq P_{PV0,t} \quad (23)$$

式(23)表明设定蓄电池的充电功率不大于光伏出力, 以保证光伏消纳可再生能源出力的作用, 不从电网吸收功率, 避免加重电网负担。

3) 网络潮流约束。

网络潮流约束如式(12)所示。考虑到 LVDN 中含有光伏、储能及各相负荷, 对于 $I_{Y,t}$ 中的每个元素, 即 φ 相节点 i 的注入电流 $I_{i,\varphi,t}$, 有:

$$I_{i,\varphi,t} = \frac{1}{U_{i,\varphi,t}^*} [P_{PV,i,\varphi,t} - (P_{ch,i,\varphi,t} - P_{dis,i,\varphi,t}) - P_{L,i,\varphi,t} - j(Q_{PV,i,\varphi,t} - Q_{L,i,\varphi,t})] \quad (24)$$

式中: $U_{i,\varphi,t}^*$ 为 t 时段 φ 相节点 i 电压 $U_{i,\varphi,t}$ 的共轭; $P_{PV,i,\varphi,t}$ 、 $Q_{PV,i,\varphi,t}$ 分别为 t 时段 φ 相节点 i 处光伏的有功、无功出力; $P_{ch,i,\varphi,t}$ 、 $P_{dis,i,\varphi,t}$ 分别为 t 时段 φ 相节点 i 处蓄电池的充、放电功率; $P_{L,i,\varphi,t}$ 、 $Q_{L,i,\varphi,t}$ 分别为 t 时段 φ 相节点 i 处的有功、无功负荷。

电流、电压需维持在一定的安全运行范围内, 即需满足:

$$|I_{ij,t}| \leq I_{max,ij} \quad (25)$$

$$U_{min,i} \leq U_{i,\varphi,t} \leq U_{max,i} \quad (26)$$

式中: $I_{ij,t}$ 、 $I_{max,ij}$ 分别为 t 时段流过支路 ij 的电流及其最大允许值; $U_{min,i}$ 、 $U_{max,i}$ 分别为节点 i 电压的最小、最大允许值。根据规定, 我国 220 V 电压等级的电压偏移运行范围为 -10%~7%, 中性线的电压主要限制范围为电压偏移小于 15% 的相电压。

同时, 网络潮流运行还应进一步考虑三相不平衡度在电力系统运行标准允许范围内, 即:

$$U_{VUF,m,t} \leq U_{VUF,max} \quad (27)$$

式中: $U_{VUF,max}$ 为三相不平衡度的最大允许值, 根据相关规定可取为 4%。

3.3 区间约束确定化及逻辑变量连续化

由式(13)~(27)构建的数学模型中, 光伏预测出力不确定性用区间数描述。由于区间数 $P_{PV,t}^*$ 存在于目标函数式(13)及不等式约束条件式(17)中, 引入置信水平 ξ 来表征区间数约束的满意程度, ξ 的取值范围为 $[0, 1]$, 将含区间数的表达式转换为一般的实数表达式^[19]。

对于目标函数式(13)及不等式约束式(17), 有:

$$\begin{cases} F_d + \sum_t \varphi [\xi P_{PV_dn,t} + (1 - \xi) P_{PV_up,t} - P_{PV0,t}] \\ 0 \leq P_{PV0,t} \leq \xi P_{PV_dn,t} + (1 - \xi) P_{PV_up,t} \end{cases} \quad (28)$$

具体地, 置信水平 ξ 表征区间数约束的满意程度更多地是从区间数约束的可能性出发, 若置信水平 ξ 越大, 则越要保证所求调度值即 $P_{PV0,t}$ 在其

约束范围内,认为 $\xi P_{PV1_dn,t} + (1-\xi)P_{PV1_up,t}$ 更趋向于取小值;若置信水平 ξ 越小,则区间数约束满足的可能性越小,认为 $\xi P_{PV1_dn,t} + (1-\xi)P_{PV1_up,t}$ 更趋向于取大值。

另一方面,在本文所述模型中,存在描述储能充、放电状态的逻辑变量 $\delta_{\varphi,t}$ 以及描述光伏并网选相控制的逻辑变量 $\lambda_{\varphi,t}$,为了降低模型的复杂程度,本文引入互补约束对逻辑变量进行连续化,具体做法如下:增加约束条件式(29),并将逻辑变量的取值范围扩充为连续实数范围 $[0,1]$ 。

$$\delta_{\varphi,t}(1-\delta_{\varphi,t})=0, \lambda_{\varphi,t}(1-\lambda_{\varphi,t})=0 \quad (29)$$

经过式(28)和式(29)处理后,本文模型被转换为确定性的非线性连续模型,采用通用代数建模系统GAMS(General Algebraic Modeling System)进行数学建模并通过调用SNOPT求解器进行求解。

4 算例分析

4.1 仿真背景

采用瑞典某包含6个用户的三相四线制LVDN进行仿真分析,系统结构见附录A图A4。配电线路的长度、阻抗等参数取自文献[20]。三相负荷及光伏出力曲线见附录A图A5。光伏在母线4处并网,容量为10 kW,配置了换相开关,可切换至任意一相;储能系统也在母线4处并网,采取三相接入方式且三相可独立调节,额定容量为20 kW·h,充放电功率限值为额定容量的1/4,充放电效率为90%。

4.2 动态选相并网对电能质量的改善情况分析

在基础数据场景基础上,暂不考虑储能配置,分析并网光伏动态选相和逆变器无功调节对仿真结果的影响。考虑与不考虑光伏选相以及逆变器无功调节时LVDN的三相不平衡度及等值网损(优化周期内该系统注入电能与消耗电能的差值)结果对比如表1所示。三相不平衡度对比如图3所示。

由表1及图3可知:当不考虑光伏动态选相并网以及逆变器无功调节时,光伏分别接于a、b、c相都将造成多数时刻三相不平衡度增加(超过2%);当考虑光伏动态选相并网以及逆变器无功调节能力时,光伏可以灵活地转移功率到不同的相序并进

表1 仿真结果对比

Table 1 Comparison of simulative results

是否考虑 逆变器 无功调节	光伏 选相	综合三相 不平衡度 / %	最大三相 不平衡度 / %	等值网损 / (kW·h)
否	a相	38.6	3.3	93.8
	b相	36.3	3.3	81.2
	c相	45.2	3.3	86.4
	动态选相	33.2	3.3	79.1
是	a相	27.6	3.2	98.5
	b相	29.5	2.7	85.6
	c相	32.0	3.0	98.6
	动态选相	20.9	2.3	80.7

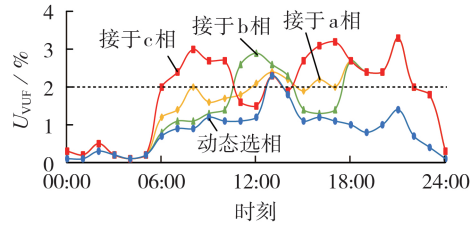


图3 三相不平衡度对比

Fig.3 Comparison of three-phase imbalance degree

行无功调节,由于调控手段增加,最小化目标函数的控制变量自由度更大,使得最大三相不平衡度和综合三相不平衡度相较于最严重的情况分别下降了30%、53.8%。相较于不考虑逆变器无功调节的场景,考虑逆变器无功调节能力之后三相不平衡度得到了较大的改善,但由于调节三相不平衡时,出现大幅吸收无功的情况,等值网损有所增加。进一步地考虑换相之后,在三相不平衡得到进一步改善的情况下,由于接入的是负荷最高相,可减缓白天吸收无功的程度,进而降低等值网损。因此同时考虑换相以及无功调节有利于改善整体电能质量。

为了进一步分析光伏并网选相结果,图4给出了并网光伏的分相并网有功功率。由图可知,光伏主要选择b相和c相并网,这与光伏出力及该区域所带三相负荷的匹配程度相关。在07:00—11:00时段,光伏出力逐渐增大,b相负荷比其他相负荷稍大,光伏出力趋向于选择b相并网,就地消纳b相负荷,调整三相负荷较为均衡;而随着午后时间的推移,12:00—15:00时段负荷均有较高的抬升,c相负荷抬升的绝对量较大,故光伏出力趋向于选择c相并网,就地消纳部分c相负荷;16:00—18:00时段则趋向于消纳b相负荷,以追求三相负荷相对均衡。由此可见,考虑光伏选相后,光伏接入可灵活切换,调度结果趋于为有较大负荷的相序提供就地电力来源,从而可更好地调节三相负荷,减小三相不平衡度。

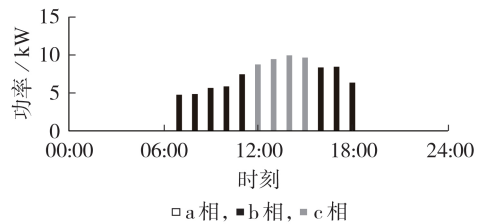


图4 光伏选相并网的有功功率

Fig.4 Active power of photovoltaic phase selection

此外,本文模型中考虑了光伏逆变器无功电压调节能力,为分析光伏逆变器无功电压调节带来的效果,在考虑光伏选相兼顾逆变器无功调节能力(情形1)的基础上,增加2种情形进行对比分析:①情形2,不接入光伏;②情形3,光伏选相只考虑有功出力。3种情形下母线4的三相电压不平衡度如图5

所示。

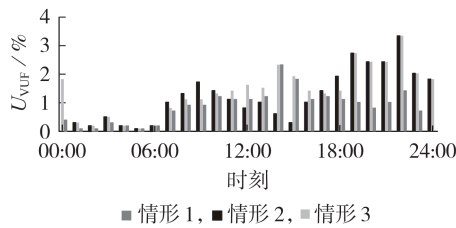


图5 三相电压不平衡度

Fig.5 Imbalance degree of three-phase voltage

由图5可知,接入光伏并考虑其动态选相、无功调节能力(情形1)后,三相电压的不平衡程度进一步降低,有利于进一步改善电压质量。光伏逆变器的无功出力见图6。结合图5和图6可知:在15:00时,光伏选择接入负荷最大的c相以抵消部分负荷,但由于负荷削减过多导致电压显著抬升,造成了更大程度的三相电压不平衡,此时光伏可进一步调节无功以降低c相电压,减小消纳光伏有功出力带来的影响;另外,光伏只在白天发出有功,晚上处于闲置状态,此时利用其光伏逆变器的无功调节能力可改善夜晚由负荷较低导致的电压偏高情况,如在01:00—06:00时段接入负荷最低的a相逆变器调节无功出力以达到降低电压的效果,减小三相电压不平衡度。

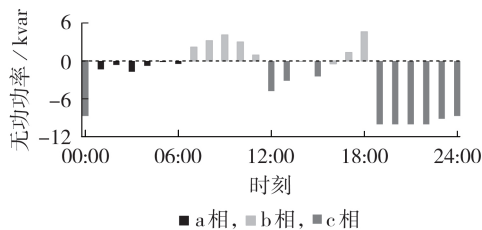


图6 光伏逆变器的无功出力

Fig.6 Reactive power output of photovoltaic inverter

4.3 储能配置对优化结果的影响

结合上节分析,由图3可以发现,当考虑光伏选相控制及逆变器无功调节能力时,仍存在局部三相不平衡程度较高的时刻(如在光伏出力较大的14:00)。这主要是因为此时的光伏有功出力较大,受光伏逆变器容量的限制,无功出力较低,无法解决由于消纳光伏而导致的电压升高问题,所以14:00时刻的三相不平衡越限,因此进一步考虑配置储能进行进一步优化,储能配置参数如前所述。考虑与不考虑储能时LVDN的电能质量和等值网损结果对比如表2所示。由表可知,配置储能后,配电网的电能质量得到进一步改善,三相不平衡度和等值网损均有所降低,最大三相不平衡度也降低至2%以内。

不同储能配置容量下LVDN的三相不平衡度和网损结果如图7所示。由图可知:储能配置容量的增大对配电网综合三相不平衡度有一定的改善,同

表2 考虑与不考虑储能时的结果对比

Table 2 Result comparison between considering and without considering energy storage

是否考虑储能	综合三相不平衡度 / %	最大三相不平衡度 / %	等值网损 / (kW·h)
否	20.9	2.3	80.7
是	13.5	1.0	79.6

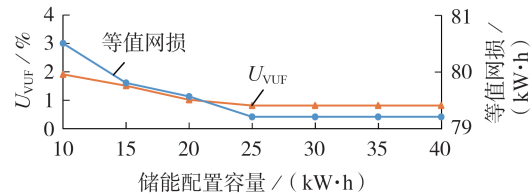


图7 不同储能配置容量下的仿真结果

Fig.7 Simulative results under different energy storage configuration capacities

时也能降低网损,但是改善效果有一定的限制,在本文算例中,当储能配置容量达到25 kW·h时,储能容量继续增大对电能质量和网损无进一步改善效果。这是因为三相不平衡度的改善目标本质上是调整三相负荷的平衡,储能虽然具有能量的时间转移特性,但是为了保证在调度周期内的充放电功率平衡,其从某一时刻存储的能量需在另一时刻释放,这就导致其均衡效果受到限制。

可见,储能能量时空转移特性既能提升LVDN的调节灵活程度,也能有效改善电能质量并降低网损;随着储能配置容量增大,LVDN的三相不平衡度、网损得到进一步改善,但改善能力有一定的限制。

4.4 光伏出力不确定性处理对优化结果的影响

本文所建模型将光伏出力的不确定性以区间数的形式表示,引入置信水平 ξ 来表征光伏调度约束的可信程度,将光伏出力区间数约束转换为确定性约束。为了反映置信水平变化对优化结果的影响,结合上述分析,对不同置信水平 ξ 下考虑与不考虑光伏换相的情况进行对比仿真,结果如附录A表A1和表A2所示。由表可知,随着置信水平 ξ 的增大,综合三相不平衡度及等值网损没有明显线性增加或减少的趋势。在工程意义上,置信水平 ξ 反映了区域调度者对光伏预测区间所持的态度, ξ 越大,则区间数约束的可能性越大,越要保证光伏出力在预测范围之内,从数学理论上讲认为光伏出力偏小。由于光伏换相所带来的三相不平衡度的减小与负荷匹配程度相关,光伏出力预测对三相不平衡度的改善并无明显线性变化趋势。总体而言,光伏出力的不确定性会造成电能质量的不确定性,但结合表A1和表A2中结果可发现,在不同的置信水平 ξ 下,考虑光伏换相后,三相不平衡度以及等值网损都得到进一步的改善。

4.5 模型连续化处理的效果分析

本文将逻辑变量通过互补约束进行连续化,构建了LVDN三相不平衡度优化的非线性连续模型,若未经连续化处理,则该模型为混合整数非线性模型。采用DICOPT求解器求解时,在未得到最优解时由于问题目标恶化而停止进一步搜索,而SBB、BARON、BONMIN这3台求解器达到计算时间设定上限(300 s)时仍未获得最优解。基于本文所提互补约束连续化处理方法,采用SNOPT求解器既能获得最优解,也提升了求解效率(求解时间为16 s)。

5 结论

本文重点关注光伏选相并网控制及光伏逆变器的无功调节能力,以改善LVDN三相不平衡度为目标,以光伏选相、无功调节及储能为调控资源,构建了含光储的LVDN三相不平衡度优化模型,并提出了互补约束对模型中的逻辑变量进行连续化处理,所得主要结论如下。

1)只利用光伏有功换相或者只采用光伏逆变器无功调节都可以改善三相不平衡度,但有功调节只在光伏出力较大时起作用,而只进行光伏逆变器无功调节又可能引起网损增加。采用光伏选相及逆变器无功调节能力后,可进一步增加LVDN调控的灵活性,进一步改善LVDN的三相不平衡度。

2)储能的能量时空转移特性可提升LVDN的调节灵活程度,有效改善LVDN的电能质量并降低等值网损,且储能配置容量的增大有利于LVDN三相不平衡度和等值网损的进一步改善,但改善能力存在一定的限制。

3)考虑光伏换相时,光伏出力的不确定性会引起电能质量变化的不确定性,与负荷匹配程度相关,但相比于不考虑光伏换相,电能质量能得到有效提升。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张勇军,刘斯亮,江金群,等. 低压智能配电网技术研究综述[J]. 广东电力,2019,32(1):1-12.
ZHANG Yongjun, LIU Siliang, JIANG Jinqun, et al. Research review on low-voltage intelligent distribution network technology[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 1-12.
- [2] 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.
- [3] 张明,谢珊珊,罗云峰. 低压配电网三相负荷不平衡优化模型的研究[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2015, 38(1): 59-62.
ZHANG Ming, XIE Shanshan, LUO Yunfeng. Optimization model of the three-phase load imbalance in low voltage distribution network[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2015, 38(1): 59-62.
- [4] 苏海峰,赵可为,李岩,等. 规模化电动汽车三相负荷平衡充电选线装置与仿真分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 103-108.
SU Haifeng, ZHAO Kewei, LI Yan, et al. Three-phase load balancing charging line selection device and simulation analysis of large-scale electric vehicle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 103-108.
- [5] 韩俊玉,高月春,赵东元,等. 基于智能选相开关的低压配电网台区负荷不平衡控制技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(3): 78-81, 87.
HAN Junyu, GAO Yuechun, ZHAO Dongyuan, et al. Study on unbalanced load control technology at low voltage distribution network area based on intelligent phase selection switch[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(3): 78-81, 87.
- [6] 方恒福,盛万兴,王金丽,等. 配电台区三相负荷不平衡实时在线治理方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2185-2193.
FANG Hengfu, SHENG Wanxing, WANG Jinli, et al. Research on the method for real-time online control of three-phase unbalanced load in distribution area[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2185-2193.
- [7] CHAMANA M, CHOWDHURY B H. Optimal voltage regulation of distribution networks with cascaded voltage regulators in the presence of high PV penetration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(3): 1427-1436.
- [8] 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 Fangge, TAN Yanghong, LUO Chunhui. Dynamic reconstruction of three-phase distribution network based on time division of fusion entropy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 78-84.
- [9] 符杨,孟祥浩,苏向敬,等. 考虑逆变器无功支撑和三相选择的不平衡主动配电网电动汽车有序充电控制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 1-12.
FU Yang, MENG Xianghao, SU Xiangjing, et al. Coordinated charging control of PEV considering inverter's reactive power support and three phase switching in unbalanced active distribution networks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 1-12.
- [10] 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, 70.
ZHAO Jinquan, LIU Xu, LIN Changnian, 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, 70.
- [11] GASTALVER-RUBIO A, ROMERO-RAMOS E, MAZA-ORTEGA J M. Improving the performance of low voltage networks by an optimized unbalance operation of three-phase distributed generators[J]. IEEE Access, 2019, 7: 177504-177516.
- [12] 赵晋泉,范晓龙,高宗和,等. 含分布式电源的三相不平衡配电网连续潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 48-53.
ZHAO Jinquan, FAN Xiaolong, GAO Zonghe, et al. Continuation power flow calculation for unbalanced three-phase distribution networks with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 48-53.
- [13] 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 Wei, LI Tianrui, ZHANG Lu, et al. Coordinated control of photovoltaic and energy storage system in low-voltage dis-

- tribution networks based on three-phase four-wire optimal power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12):31-40.
- [14] SAAD I E S, SAAD N H, EL-KHATTAM W A S. Optimal unbalance mitigation for three-phase distribution networks equipped with single-phase PV systems[C]//2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference. Cairo, Egypt: IEEE, 2018:980-985.
- [15] 张勇军, 张懿恒, 刘斯亮, 等. 考虑分布式光伏与储能接入的配变双层规划[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24):9-15.
ZHANG Yongjun, ZHANG Siheng, LIU Siliang, et al. Dual planning of a distribution transformer considering the impact of distributed photovoltaics and energy storage access[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24):9-15.
- [16] 高鹏程, 王蕾, 李立生, 等. 基于光伏逆变器调节的配电网电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4):190-196.
GAO Pengcheng, WANG Lei, LI Lisheng, et al. Voltage control strategy based on adjustment of PV inverters in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4):190-196.
- [17] 吴国沛, 王武, 张勇军, 等. 含光储系统的增量配电网时段解耦动态拓展无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9):173-179.
WU Guopei, WANG Wu, ZHANG Yongjun, et al. Time decoupled dynamic extended reactive power optimization in incremental distribution network with photovoltaic-energy storage hybrid system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9):173-179.
- [18] 韩平平, 潘薇, 张楠, 等. 基于负荷预测和非支配排序遗传算法的人工相序优化方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20):71-78.
- [19] 达庆利, 刘新旺. 区间数线性规划及其满意解[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(4):3-7.
DA Qingli, LIU Xinwang. Interval number linear programming and its satisfactory solution[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1999, 19(4):3-7.
- [20] SCHWANZ D, MÖLLER F, RÖNNBERG S K, et al. Stochastic assessment of voltage unbalance due to single-phase-connected solar power[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2):852-861.

作者简介:



陈家超

陈家超(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为智能配电网、电力系统电压控制(E-mail:1298554802@qq.com);

李钦豪(1989—),男,工程师,博士,通信作者,主要研究方向为无功电压控制、智能配电网运行控制等(E-mail:liqinhao@scut.edu.cn);

张勇军(1973—),男,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为智能配电网与能源互联网、电力系统无功规划与电压控制等(E-mail:zhangjun@scut.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Three-phase balance optimization of low-voltage distribution network considering photovoltaic phase selection and switching

CHEN Jiachao, LI Qinhao, TANG Yuan, ZHANG Yongjun

(Research Center of Smart Energy Technology, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The access of single-phase photovoltaic power supply usually causes the increase of unbalance degree of LVDN (Low-Voltage Distribution Network). Aiming at the current difficulties of load commutation and the applicability of photovoltaic coordinated control in three-phase four-wire LVDN, the three-phase balance optimization model of LVDN is proposed. Based on the node admittance matrix of three-phase four-wire system, the power flow equation of LVDN is established with the injection current unbalance. With the objective of minimizing the three-phase unbalance degree, the three-phase balance coordinated optimization control model is established considering the photovoltaic phase selection and switching, the reactive power regulation of photovoltaic inverter and the active power regulation of energy storage. Interval constraints are used to describe the uncertainty of photovoltaic output, and the continuous logic variables are used to reduce the difficulty of solving the three-phase four-wire LVDN model. The general algebraic modeling system is used for modeling, simulation and solution. The simulative results show that the proposed optimization method can effectively reduce the three-phase unbalance degree and network loss of LVDN.

Key words: distributed photovoltaic; phase selection; three-phase unbalance; low-voltage distribution network; three-phase four-wire

附录 A



图 A1 支路模型
Fig.A1 Branch model

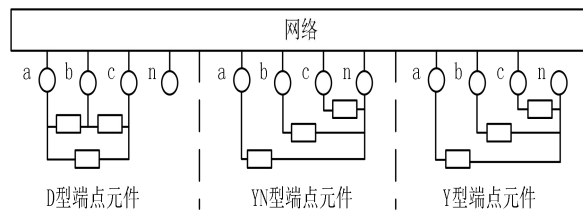


图 A2 端点模型
Fig.A2 Endpoint model

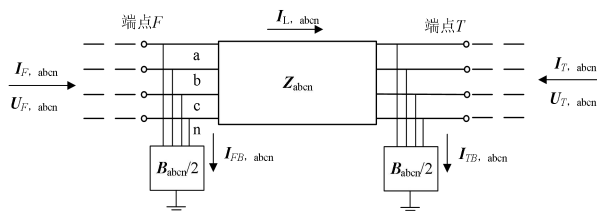


图 A3 线路模型
Fig.A3 Line model

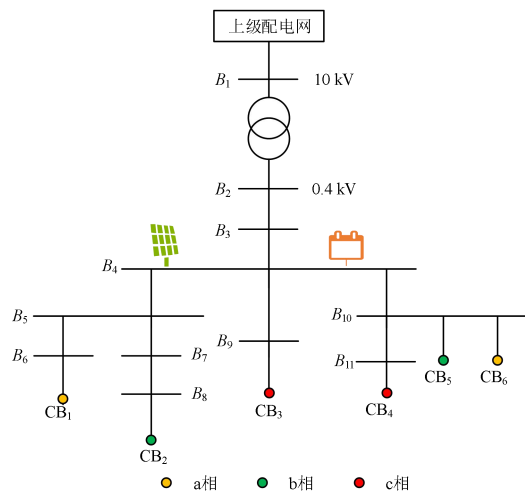


图 A4 LVDN 结构示意图
Fig.A4 Structure diagram of LVDN

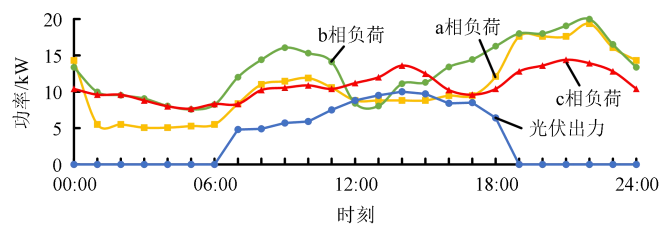


图 A5 负荷和光伏出力曲线
Fig.A5 Load and photovoltaic output power curves

表 A1 不同置信水平下的三相不平衡度对比
Table A1 Comparison of three-phase imbalance degree under different confidence levels

ξ	三相不平衡度/%			
	光伏接 a 相	光伏接 b 相	光伏接 c 相	光伏选相
0	38.6	36.3	45.2	20.9
0.2	37.7	35.9	43.7	20.2
0.4	37.2	34.9	42.8	19.0
0.6	36.5	34.2	41.9	18.0
0.8	36.0	34.3	41.1	18.3
1.0	35.2	34.6	40.8	18.5

表 A2 不同置信水平下的等值网损
Table A2 Equal network loss under different confidence levels

ξ	等值网损/(kW·h)			
	光伏接 a 相	光伏接 b 相	光伏接 c 相	光伏选相
0	93.8	81.2	86.4	80.7
0.2	93.4	81.3	86.3	80.8
0.4	92.9	81.4	86.3	81.1
0.6	92.5	81.5	86.3	81.3
0.8	92.1	81.7	86.2	81.0
1.0	91.7	81.9	86.3	80.8