

信息物理环境下基于电力电子变压器的 跨台区光伏消纳策略

刘科研¹, 盛万兴¹, 赵鹏杰², 叶学顺¹, 吴俊勇², 孙安国²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 苏州海德蓝电气科技有限公司, 江苏 苏州 215131)

摘要:高比例光伏接入低压配电网易导致潮流反转和电压越限问题。在基于电力电子变压器(PET)互联的交直流配电网中,通过PET之间的功率互济实现光伏消纳,可有效降低潮流反转和电压越限的概率,如何协调交互功率是关键问题。配电网信息物理系统(CPS)集中控制可实现优化分配,但大规模配电网中难以保证通信质量。为此,提出了一种基于改进下垂特性的双模式自适应控制(DBAC)方法,以直流母线电压为全局变量,以各台区PET的端口状态为局部变量,通过引入传输因子,实现PET端口在发送或接收功率模式之间的平滑切换;通过引入不平衡因子,实现光伏功率在接收台区之间按需分配;无需跨台区通信和集中控制,即可实现跨台区PET之间的功率互济。为了验证所提策略的正确性和有效性,构建了由先进配电网小步长仿真机、OPNET和配电主站组成的配电网CPS仿真平台,建立了基于PET的交直流配电网信息物理模型。仿真算例的结果验证了所提DBAC方法可实现高比例光伏跨台区消纳。

关键词:电力电子变压器;光伏消纳;下垂特性;功率互济;信息物理系统;交直流配电网

中图分类号:TM 615

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202011014

0 引言

大规模分布式光伏接入配电网会带来线路电压过高、线路过载、潮流倒送和保护误动等风险,同时改变了原有配电网放射状的供电特性。分布式光伏功率具有间歇性、波动性的缺点,使得传统配电网在可靠性、运行优化等方面面临着巨大的挑战^[1]。采用基于双向变流器的交直流混合微电网方案可实现光伏消纳,但受限于微电网的容量,所接入的可再生能源容量通常较小,且微电网不支持多区域间的功率协调优化和调控^[2]。2011年,美国北卡罗来纳州立大学提出了基于未来可再生能源传输与管理系统的^[3],此后,以电力电子变压器PET(Power Electronic Transformer)为核心的交直流电网结构相继被提出^[4-5]。该结构可在多个交直流区域、多个电压等级集成分布式可再生能源,增强调控能力,实现其更加灵活、安全的接入,同时实现系统灵活组网,在更大的范围内互联互通,实现可再生能源的充分消纳^[2]。针对智能配电网的PET,已有相关文献从拓扑结构、关键参数设计方面进行了研究并将其应用于产品^[6]。基于PET构建多台区互联的交直流配电网,将互联的台区作为备用容量,即使某一台区接入高比例分布式光伏,但其对整个互联配电网的整体渗透率会大幅降低,对配电网的影响会降到最低,互联结构因此具备灵活性。在这一背景下,PET的控制策略成为关注的重点。文献[7]通过PET的功率-电压协调控制,使得基于PET的交直流配电网具备促进分布式电源就地消纳的能力;文献[8]提出了基于下垂移相的功率协调策略,实现了PET直流多端口的功率分配;文献[9]以双有源桥作为2个直流电网之间的互联装置,采用直流母线电压实现了功率协调控制,但未涉及3个及以上电网互联的情况;文献[10]提出了一种包含输入级、隔离级、输出级的三端口PET,同时提出了通过调整输入级和隔离级的高压直流电压实现协调控制各端口传输功率的方法;文献[11]针对三端口微电网系统,采用下垂控制实现了微电网内部的功率分配。

上述文献提出了PET内各端口的控制策略,实现了PET内的协调运行,但针对本文所研究的跨区域功率调度问题,还未有针对性的文献对多个PET间的跨台区控制策略进行研究。在配电网逐渐成为信息物理系统CPS(Cyber Physical System)的背景下,CPS调度控制PET是最优的选择。但是,未来电网中的分布式电源众多,分布区域广泛,全方位调度控制对配电自动化系统的通信带宽要求增加,会降低系统的可靠性,为此如何在降低通信要求的条件下实现基于就地信息的自适应协调控制,是本文的研究重点。

本文面向基于PET构成的交直流配电网,以高

收稿日期:2020-05-06;修回日期:2020-09-15

基金项目:国家电网公司科技项目(基于信息物理系统的复杂配电网建模与数模混合仿真技术研究)(PD71-18-001)

Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China (Research on Complex Distribution Network Modeling and Digital Analog Hybrid Simulation Technology based on Cyber Physical Systems) (PD71-18-001)

比例分布式光伏的跨台区高效消纳为研究目标,提出了一种基于改进下垂特性的双模式自适应控制 DBAC(improved Droop characteristics-based Bi-mode Adaptive Control)方法。通过引入传输因子和不平衡因子对传统的下垂控制进行改进,并将其应用于台区互联端口;不依赖台区间的通信系统,提高了控制策略的抗干扰性和稳定性。每个台区的 PET 自动感知中压母线的电压幅值,根据 PET 的端口信息就可以实时决策传输功率,相互之间不存在控制和制约关系,台区的可扩展性强。最后,基于中国电科院配电网 CPS 综合仿真平台,对信息物理环境下分布式光伏跨区域消纳、采用 DBAC 方法实现光伏跨区域消纳这 2 种场景进行了模拟仿真。通过搭建基于 PET 的交直流配电网的信息物理模型,进行 CPS 联合仿真对比验证了本文所提策略,以期为基于 PET 的交直流配电网建设提供有效的决策支持。

1 基于 PET 的交直流配电网系统描述

1.1 PET 及交直流配电网结构

目前 PET 的典型拓扑主要有 3 类^[12-13],为了解决分布式光伏消纳问题,本文采用一种四端口 PET,其拓扑结构如图 1 所示。PET 高压侧由级联 H 桥变流器和双有源桥变流器构成电网端口(P_{grid}),将 10 kV 交流电变换为 800 V 直流电,实现了 PET 接入配电网;800 V 直流母线电压的变化可反映系统的功率流动和实时能量平衡情况;全桥隔离 DC/DC 变流器构成了 20 kV 直流互联端口(P_{out}),实现多台区 PET 的互联;三相桥式电压源换流器 VSC (Voltage Source Converter) 构成 380 V 交流端口(P_{ac}),接入交流负荷与分布式电源;全桥隔离 DC/DC 变流器构成 375 V 直流端口(P_{dc}),接入直流负荷、储能和小型分布式光伏。各个端口均具备潮流双向流动能力,将图 1 中箭头所示方向设定为功率流的正方向。

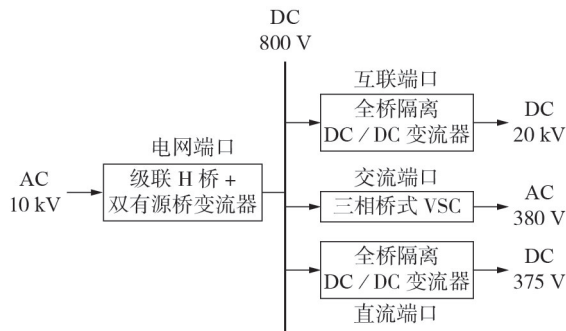


图 1 四端口 PET 的拓扑结构

Fig.1 Topology structure of four-port PET

将上述 PET 应用于配电网,可构成基于 PET 的交直流配电网。PET 的交直流端口不仅可接入配电网负荷,各类清洁能源也可经交流端口或直流端口

接入配电网。多台 PET 互联的交直流配电网的典型拓扑结构见附录中图 A1。

各个物理台区都包含 1 台 PET、配电系统交流负荷、分布式光伏等。各台区 PET 通过 10 kV 交流母线接入配电网;各台区 PET 的互联端口通过 20 kV 中压直流母线实现互联,利用多个台区间的互济能力,可将光伏发电剩余的台区的光伏功率输送至其他台区,有效地解决清洁能源“并不上”、“难消纳”的问题。

1.2 基于 PET 的交直流配电网功率流建模

对图 A1 中多台区互联的交直流配电网的功率流进行建模。单台区的模型如下:

$$P_{\text{grid}}^i = P_{\text{dc}}^i + P_{\text{ac}}^i + P_{\text{out}}^i \quad (1)$$

$$P_{\text{dc}}^i = -P_{\text{pv_dc}}^i + P_{\text{load_dc}}^i \quad (2)$$

$$P_{\text{ac}}^i = -P_{\text{pv_ac}}^i + P_{\text{load_ac}}^i \quad (3)$$

$$P_{\text{pv}}^i = P_{\text{pv_ac}}^i + P_{\text{pv_dc}}^i \quad (4)$$

$$P_{\text{load}}^i = P_{\text{load_ac}}^i + P_{\text{load_dc}}^i \quad (5)$$

其中, P_{grid}^i 为配电网 10 kV 交流母线注入台区 i 的功率,注入功率时其值为正; P_{dc}^i 为台区 i 的直流端口功率,注入功率时其值为正; P_{ac}^i 为台区 i 的交流端口功率,注入功率时其值为正; P_{out}^i 为台区 i 中 PET 的互联端口注入 20 kV 中压直流母线的功率,注入功率时其值为正,且初值为 0; P_{pv}^i 为台区 i 中接入光伏系统的总功率; $P_{\text{pv_ac}}^i$ 、 $P_{\text{pv_dc}}^i$ 分别为台区 i 交流端口、直流端口接入光伏的功率; P_{load}^i 为台区 i 的总交直流负荷; $P_{\text{load_ac}}^i$ 、 $P_{\text{load_dc}}^i$ 分别为台区 i 交流端口、直流端口的负荷功率。

设 P^i 为基于 PET 的交直流配电网中台区 i 的光伏功率与负荷功率差值,即:

$$P^i = P_{\text{pv}}^i - P_{\text{load}}^i = -(P_{\text{ac}}^i + P_{\text{dc}}^i) \quad (6)$$

$P^i > 0$ 表示台区 i 内的光伏功率大于负荷功率,即有光伏功率剩余; $P^i < 0$ 表示台区 i 内的光伏功率小于负荷功率,即存在功率缺额。

多台区的互联模型如下:

$$\sum_{i=1}^n P_{\text{out}}^i = 0 \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n P_{\text{grid}}^i + \sum_{i=1}^n P_{\text{pv}}^i = \sum_{i=1}^n P_{\text{load}}^i \quad (8)$$

其中, n 为交直流配电网中台区的数量。式(7)表示所有台区的互联功率代数和为 0,式(8)为多台区互联配电网的功率平衡方程。

2 基于 PET 的交直流配电网的运行特性

分布式光伏通过 PET 的交流端口或直流端口接入配电网。当光伏渗透率逐渐变大时,基于 PET 的交直流配电网可以划分为台区内光伏消纳、跨台区光伏消纳这 2 种运行特性。台区内光伏消纳可细分

为无光伏或本台区端口内部消纳(S_1)和本台区交/直流端口间互济消纳(S_2),跨台区光伏消纳可细分为跨台区互济消纳(S_3)和并网消纳(S_4)。基于PET的交直流配电网的运行状态及端口工作模式如表1所示。其中切换条件如式(9)~(12)所示。

$$P_{pv_ac}^i \leq P_{load_ac}^i \text{ 且 } P_{pv_dc}^i \leq P_{load_dc}^i \quad (9)$$

$$P^i \leq 0 \text{ 且 } (P_{pv_ac}^i - P_{load_ac}^i)(P_{pv_dc}^i - P_{load_dc}^i) < 0 \quad (10)$$

$$\text{存在 } P^i > 0, \text{ 且 } \sum_{i \in I} P^i \leq 0 \quad (11)$$

$$\text{存在 } P^i > 0, \text{ 且 } \sum_{i \in I} P^i > 0 \quad (12)$$

其中, I 为配电网中台区编号集合。

表1 运行状态及端口工作模式

Table 1 Operation states and port operation modes

运行状态	切换条件	端口工作模式			
		电网端口	直流端口	交流端口	互联端口
S_1	式(9)	定电压	定电压	V/F	DBAC
S_2	式(10)	定电压	定电压	V/F	DBAC
S_3	式(11)	定电压	定电压	V/F	DBAC
S_4	式(12)	定电压	定电压	V/F	DBAC

当运行状态为 S_1 时,某台区的光伏总功率不大于负荷总功率,且交流、直流端口处的光伏功率均不大于负荷功率;当运行状态为 S_2 时,某台区的光伏总功率不大于负荷总功率,但交流端口、直流端口中只有1个端口处的光伏功率大于负荷功率。已有众多文献对PET内部端口的控制策略进行了研究,可知采取上述控制模式可实现光伏功率完全消纳。

当运行状态为 S_3 时,某台区的光伏功率大于负荷功率,但整个基于PET互联的配电网的光伏总功率仍不大于负荷总功率;当运行状态为 S_4 时,整个基于PET互联的配电网的光伏总功率大于负荷总功率,剩余光伏功率必须并入配电网消纳。如何调节互联端口间的传输功率是实现跨台区光伏消纳的关键,本文的重点就是针对PET的互联端口,提出一种DBAC策略。

3 DBAC方法

文献[14]提出了一种风电自适应并网策略,风电功率按换流站的容量进行分配;文献[15]提出了多端柔性直流输电系统的直流电压自适应下垂控制策略,但其换流站的运行状态恒定,连接交流电网的换流站运行于吸收功率状态;文献[16]提出了基于主控制器和通信的分布式控制算法,设置下垂增益实现对功率的控制,但其对通信系统的要求较高。

将传统下垂控制应用于PET的互联端口,可以实现电压稳定。传统下垂控制的 $P-V$ 特性曲线为:

$$U_{dc} - U_{dref} = \frac{1}{K} P_{out} \quad (13)$$

其中, U_{dc} 为互联端口的高压直流侧电压; U_{dref} 为互

联端口高压直流侧电压的额定值,电压的正常范围设定为额定电压的 $\pm 5\%$; P_{out} 为互联端口的功率,输出功率时其值为正; K 为下垂特性系数。

与传统下垂控制场景不同,本文在基于PET的交直流配电网的运行过程中,每个互联端口均存在向其他台区输出功率、从其他台区吸收功率这2种工作模式。如果互联端口的变流器全部采用式(13)所示的下垂特性曲线,虽然可以控制互联直流母线电压,但当台区内出现剩余光伏功率时,由图1所示拓扑结构可看出,功率的倒送致使PET内部800 V直流母线电压升高,但对互联直流母线电压无任何影响,互联端口不能实现剩余光伏功率在台区间传输。

因此,面向基于PET的交直流配电网结构,本文以跨台区光伏消纳为研究目标,对传统下垂控制进行改进,提出了一种DBAC方法。

自适应工作模式1:互联端口运行于输出功率状态,即 $P_{out} > 0$ 。引入传输因子 ΔP 和补偿因子 ε ,对式(13)所示 $P-V$ 特性曲线进行修改,则式(13)可以改写为:

$$U_{dc} - U_{dref} = \frac{1}{K} (P_{out} - \Delta P - \varepsilon) \quad (14)$$

传输因子 ΔP 如式(15)所示;补偿因子 ε 通过对实时功率偏差进行积分得到,如式(16)所示。

$$\Delta P = P^i \quad (15)$$

$$\varepsilon = \int (P_{out} - \Delta P) dt \quad (16)$$

自适应工作模式1的调节曲线如图2所示,PET检测台区交流端口、直流端口的功率,确定本台区的功率剩余情况,自动调节下垂曲线,当互联端口需要输出光伏功率时,运行点由A转移到B,互联端口开始向中压直流母线注入功率,这必然导致直流母线电压升高,继而系统运行于点C,经过补偿因子 ε 修正后,实现无差调节,最终系统运行于点D。本文所提方法在保证互联直流母线电压稳定的前提下,实现了剩余光伏功率的输出。

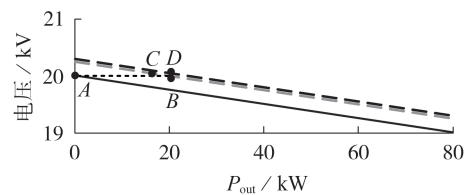


图2 自适应工作模式1的调节曲线

Fig.2 Adjusting curves of adaptive operation mode 1

自适应工作模式2:互联端口运行于吸收功率状态,即 $P_{out} < 0$ 。当PET的互联端口输出功率至互联直流母线时,母线电压上升,传统下垂控制可根据母线电压波动实现功率的吸收。但是,传统下垂控

制一般根据互联变流器的容量设置下垂特性系数,采用固定的下垂特性系数存在直流电压质量低、功率分配特性差等缺点。针对上述缺点,本文引入受端台区本地不平衡因子 β ,将式(13)改写为式(17),目的是在直流电压变化量相同的情况下,使互联端口按照各台区的不平衡功率比例实现吸收功率的合理分配。

$$U_{dc} - U_{dref} = \frac{1+\beta}{K} P_{out} \quad (17)$$

$$1+\beta = \frac{P_N + P^i - P_{out}}{P_N} \quad (18)$$

其中, P_N 为台区互联端口的额定容量。

对式(17)进行求导,得到直流电压对吸收功率 P_{out} 的变化率 $\partial U_{dc} / \partial P_{out}$ 为:

$$\partial U_{dc} / \partial P_{out} = \frac{P^i + P_N - 2P_{out}}{P_N K} \quad (19)$$

(1)当 $P^i - 2P_{out} < 0$ 时,吸收功率少,下垂特性系数满足:

$$\frac{P^i + P_N - 2P_{out}}{P_N K} < \frac{1}{K} \quad (20)$$

此时下垂控制侧重影响直流电压调节,实际的直流电压相对基于固定下垂特性系数控制所得直流电压的偏差较小。

(2)当 $P^i - 2P_{out} > 0$ 时,吸收功率多,下垂特性系数满足:

$$\frac{P^i + P_N - 2P_{out}}{P_N K} > \frac{1}{K} \quad (21)$$

此时下垂控制侧重影响功率分配,避免电压超限或单个互联端口功率超限,功率分配特性较好。

自适应工作模式2的调节曲线及下垂特性系数曲线如图3所示。由图3(a)可知,在同一直流电压下,吸收功率可按不平衡功率比例合理分配。

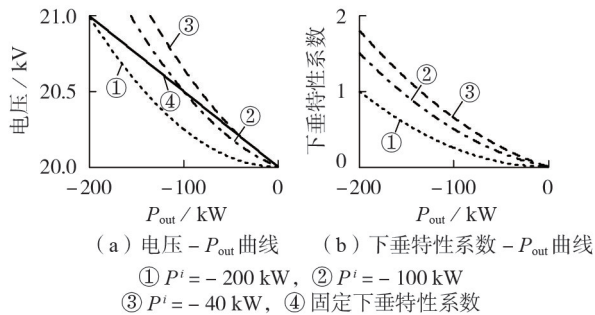


图3 自适应工作模式2的调节曲线和下垂特性曲线

Fig.3 Adjusting curves and droop characteristic curves of adaptive operation mode 2

DBAC方法的控制函数可表示如下:

$$\begin{cases} U_{dc} - U_{dref} = \frac{1}{K} (P_{out} - \Delta P - \varepsilon) & \Delta P \geq 0 \\ U_{dc} - U_{dref} = \frac{P_N + P^i - P_{out}}{P_N K} P_{out} & \Delta P < 0 \end{cases} \quad (22)$$

在图1所示拓扑结构中,互联端口的结构为全桥隔离DC/DC变流器,其直接功率控制方程如式(23)所示。

$$P_{out} = U_{in} U_o D_c (1 - D_c) \quad (23)$$

其中, U_{in} 、 U_o 分别为全桥隔离DC/DC变流器的输入电压、输出电压; D_c 为相移控制量。

互联端口的DBAC框图如图4所示。台区内的PET采集端口信息,决定互联端口的控制模式。图中,当 $\Delta P < 0$ 时,控制模式为1;反之,控制模式为0。

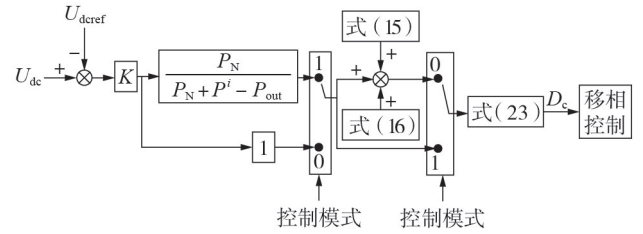


图4 互联端口的DBAC框图

Fig.4 DBAC block diagram of interconnected port

由上述分析可知,DBAC方法将中压直流母线电压设定为全局变量,发送端主动将台区的剩余功率发送至互联中压直流母线,引起直流电压升高,接收端根据本台区的不平衡功率将发送端输出的功率进行合理分配;功率调节关系由不平衡功率和电压允许波动量决定,实时灵活调节下垂特性系数,保证了互联中压直流母线电压波动不超过允许的运行范围。

4 配电网CPS仿真平台

上海交通大学提出了基于MATLAB和Ptolemy II平台的CPS仿真系统^[17];东南大学建立了基于OPAL-RT和OPNET的电力CPS实时仿真平台^[18];中国电力科学研究院根据配电网的特性,建立了基于中国电力科学研究院自研的先进配电网小步长实时仿真机(ADN-SIM)、OPNET和Labview构成的配电网CPS综合仿真平台。配电网CPS综合仿真平台包括物理模型层、通信模型层、信控模型层3层架构,如附录中图A2所示。物理模型层由中国电力科学研究院研制的先进配电网小步长实时仿真机组组成,可实现最小精度为 $10 \mu s$ 级的实时仿真;通信模型层由OPNET软件组成,通过搭建终端、交换机、路由器等设备及其拓扑关系,可实现通信系统的等比例建模仿真;信控模型层包含配电主站设备,实现相应的信控策略和监控可视化。

4.1 基于PET的交直流配电网的物理层建模

先进配电网小步长实时仿真机是基于MATLAB/Simulink环境的多核并行处理实时仿真器,通过在Simulink中搭建相关的模型,编译C语音代码进行并行运算,达到实时仿真的效果。众多学者已在MATLAB/Simulink中搭建了传统四端口PET模型与配电网模型,该方面已有相当成熟的方法与理论^[19-20]。

针对配电网CPS的特性,本文的工作是对已有模型进行改进。首先,针对PET中的大量开关管和电力电子电路,采用平均化建模方法,保证物理模型的仿真步长达到 $50\mu\text{s}$ 不失真,避免电力仿真软件与通信软件之间的时间同步问题;然后,建立具备量测控制功能的智能配电终端模型,并将其加装于PET及各馈线开关处,使PET具备数据采集、信息上传和本地控制能力。

4.2 基于PET的交直流配电网的通信建模

交直流配电网的通信建模包括通信网络建模和信息流建模。

本文在通信仿真软件OPNET中使用虚拟终端、交换机、路由器模型,建立通信网络拓扑。在OPNET的Task Configuration模块和Application Configuration模块中对信息特征(数据包类型、字节大小、传输方向、转发延时)进行配置,在OPNET的Profile中设定每次仿真循环中各个应用(application)的执行规律,包括信息触发时间、重复次数、重复间隔,从而实现信息流建模。

5 仿真验证

5.1 仿真模型

本文依托中国电力科学研究院的配电网CPS仿真平台,改造某地区62节点配电网算例,接入光伏发电系统,并根据4.1节的建模方法,建立基于PET三台区互联的交直流配电网的物理层模型,见附录中图A3;根据4.2节的建模方法,基于OPNET构建交直流配电网的通信网络模型,见附录中图A4。

5.2 仿真分析

设定各台区互联端口的最大功率为200 kW,直流母线电压的基准值为20 kV,且将直流母线电压偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内,下垂特性系数 $K=-200$ 。

算例1:PET互联端口应用本文所提DBAC方法进行控制。设定3个台区的交直流总负荷分别为100、110、80 kW,3个台区的最大光伏出力分别为170、175、0 kW,各台区4个端口的功率流动情况如图5所示。

算例1仿真了第2节中的运行状态及其过渡过程。0~9.8 s的运行状态为 S_1 或 S_2 ,即各台区内的光伏功率均不大于负荷功率(对于低比例光伏接入时局域PET实现光伏消纳,本文不再论述);9.8~13 s的运行状态为 S_3 ,台区1的互联端口运行于自适应工

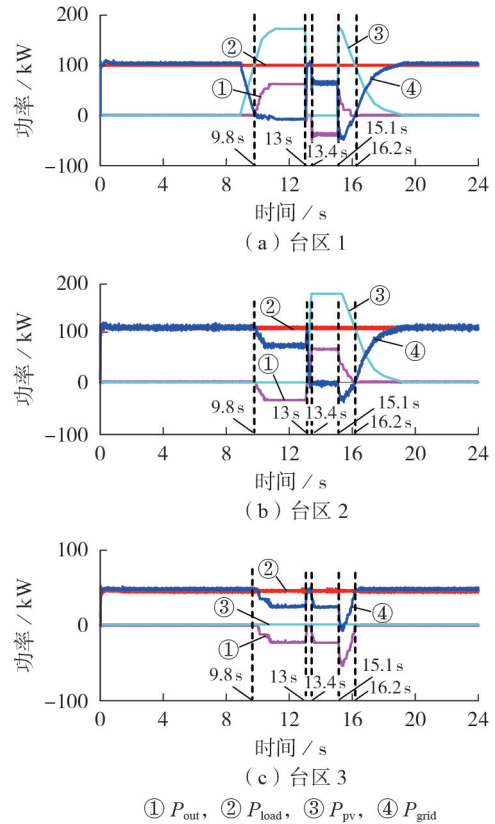


图5 算例1中各台区的功率流动情况

Fig.5 Power flow of each transformer district in Case 1

作模式1,台区2和台区3的互联端口均运行于自适应工作模式2,台区1分别有35、22 kW的剩余光伏功率流向台区2和台区3,实现光伏消纳;13~13.4 s,台区1的光伏退出运行,变为功率缺额台区,台区2的光伏功率逐渐增大,但仍然小于负荷功率,其状态变为状态 S_1 或 S_2 ;13.4~15.1 s,台区2成为功率剩余台区,开始向台区1和台区3分别输送40、23 kW功率;15.1~16.2 s的运行状态为 S_4 ,15.1 s时台区1的光伏再次接入,使得光伏功率超过负荷功率,在本文所提控制策略下,光伏功率完成并网消纳;16.2~24 s,再次进入运行状态 S_1 或 S_2 。

在9.8~15.1 s的过程中,台区1和台区2的互联端口应用DBAC方法,分别实现了双模式切换,切换过程中互联直流母线电压波形如图6所示。直流母线电压随着互联端口传输光伏功率的变化而波动,但波动幅度均在允许的范围,双模式切换瞬

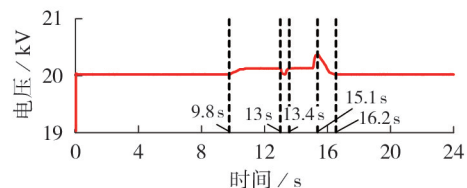


图6 互联直流母线电压波形

Fig.6 Voltage waveform of interconnected DC bus

间未对直流母线电压造成冲击,切换过程平滑。15.1~16.2 s时段内,在配电网负荷节点成为发电节点的极端情况下,本文所提策略通过潮流反转方式保证了光伏并入电网。

算例 2:文献[14]提出了一种变截距实现电压稳定的方法,该方法也可用于控制变流器进行功率交换。本文选取不同的光伏渗透率进行仿真,对比变截距下垂控制方法与 DBAC 方法对高比例光伏的消纳效果,结果如表 2 所示。其中,光伏渗透率定义为台区 1 中光伏功率与总负荷功率的比值,中压母线输出功率是指台区 1 经互联端口的中压直流母线输出的功率,光伏消纳率定义为互联端口输出功率与台区 1 中剩余功率 P^i 的比值。

表 2 算例 2 的仿真结果

Table 2 Simulative results of Case 2

台区 1 的 光伏渗透 率 / %	中压母线输出功率 / kW		光伏消纳率 / %	
	变截距下垂 控制方法	DBAC 方法	变截距下垂 控制方法	DBAC 方法
150	43.5	47.5	87.00	95.00
180	71.0	79.0	88.75	98.75
230	108.5	121.0	83.46	93.10

由表 2 可知,变截距下垂控制方法是偏差控制,基于该方法的光伏消纳率都普遍低于 90%,而本文所提 DBAC 方法可减少下垂偏差,在保证直流母线电压稳定的前提下,提高了光伏消纳率。

算例 3:设置台区 1 存在剩余光伏功率,模拟台区 2 的负荷发生波动,采用 DBAC 方法和传统下垂控制方法得到台区 2 的功率流动情况,分别见附录中图 A5 和图 A6。由图 A5 可知,当受端台区的不平衡量发生变化时,自适应控制系数会相应地改变。12 s 时台区负荷减少,自适应减少台区吸收的功率,13 s 时台区负荷增加,台区吸收的功率增加。由图 A6 可知,传统下垂控制将控制系数设置为定值,无法针对台区内的负荷波动做出反应,自适应能力差。

算例 4:在采集各台区的负荷 / 光伏出力和双向通信通道正常的前提下,通过配电网 CPS 集中控制方法可根据各台区的剩余功率和消纳潜力,均匀分配各台区中压直流互联端口的功率,达到一种合理的理想状态。但在该方法下,CPS 的通信负担重,一旦通信出现延时甚至短时中断,会造成台区功率波动甚至危及中压直流母线的稳定运行。配电网 CPS 的集中控制方法与 DBAC 方法的区别在于:DBAC 方法基于改进的下垂控制特性,通过 $P-V$ 特性可保持电压稳定;CPS 集中控制方法必须选取某一台区的互联端口采用定电压控制,其他端口进行功率分配。算例 4 选取台区 3 的互联端口控制直流母线电压,不参与功率调节。

设定 3 个台区的交直流总负荷分别为 100、110、80 kW,最大光伏出力分别为 180、0、0 kW。采用

CPS 集中控制方法进行光伏消纳仿真,各台区 4 个端口的功率流动情况见附录中图 A7 和图 A8。

在算例 4 中,9.8 s 时台区 1 的光伏功率大于负荷功率,配电主站接收量测信息并下发命令,将台区 1 的剩余功率调度至台区 2,实现了光伏消纳。由图 A7 可知,在信息的上传下发过程中,产生了约 4 ms 的延时,在功率调度中 4 ms 延时的影响可以忽略。若传输的数据量增加,会增大延时,甚至出现通信链路堵塞的隐患。

算例 1 和算例 2 的结果表明:随着光伏功率的变化,台区作为接收端或发送端的状态会发生切换,DBAC 方法具备多状态调节和平滑切换能力,其光伏消纳率更高。

算例 1 和算例 3 的结果表明:DBAC 方法具备动态调节能力,各台区的互联端口可根据中压直流母线电压的变化情况和各自的光伏消纳能力自动调整,自适应能力强。

算例 1 和算例 4 的结果表明:CPS 集中控制方法具备全局优化能力,但会存在以下 2 个问题:①大量基于 PET 的交直流配电网互联后,如何保证海量数据上传下发过程中的通信性能指标;②如何确定针对网络攻击的防护措施以及如何保证发生通信故障后光伏的可靠消纳。

相较而言,对于基于 PET 的交直流配电网而言,对 PET 互联端口采用 DBAC 方法,仅通过中压直流母线信息和 PET 内部信息自主实现跨台区功率互济,不存在信息堵塞和网络攻击风险,具有更强的抗干扰性和稳定性。通过高比例分布式光伏的就地消纳和跨台区消纳,整个配电网消纳可再生能源的能力得到了提高。

6 结论

针对配电网中分布式光伏并网的问题,本文基于多台区 PET 互联的交直流配电网拓扑,提出了一种 DBAC 方法。通过理论分析和算例仿真,得出如下结论:

(1)对于含高比例分布式光伏接入的基于 PET 的交直流配电网,采用本文所提 DBAC 方法可实现高比例分布式光伏在台区内及跨台区消纳,避免分布式能源消纳过程中交流配电网发生电压越限等问题;

(2)DBAC 方法通过引入传输因子和不平衡因子,仅根据互联中压直流母线电压和 PET 的端口状态,便可实现多台区间协调运行和跨台区互济消纳,并确保多状态间的平滑切换;

(3)采用 DBAC 方法可实现分布式自适应控制,台区间无需通信线路,具有抗干扰性和稳定性。

本文所提方法可利用 PET 实现跨台区的光伏消纳,从而为含高比例分布式光伏接入的交直流配电

网的运行控制提供参考建议。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [2] 蒲天骄, 李焯, 陈乃仕, 等. 基于电力电子变压器的交直流混合系统优化运行控制关键技术及研究框架[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2752-2759.
PU Tianjiao, LI Ye, CHEN Naishi, et al. Key technology and research framework for optimal operation control of hybrid AC/DC system based on power electronic transformer[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2752-2759.
- [3] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management(FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [4] BIFARETTI S, ZANCHETTA P, WATSON A, et al. Advanced power electronic conversion and control system for universal and flexible power management[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 231-243.
- [5] BOYD J. An internet-inspired electricity grid[J]. IEEE Spectrum, 2013, 50(1): 12-14.
- [6] 王哲, 李耀华, 李子欣, 等. 三相级联H桥型电力电子变压器电容值设计方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 219-224.
WANG Zhe, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Design method of capacitance value of three-phase cascaded H-bridge power electronic transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 219-224.
- [7] 刘向龙, 刘友波, 张宸宇, 等. 基于电力电子变压器的交直流混合配电网功率-电压协调控制[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(2): 35-43.
LIU Xianglong, LIU Youbo, ZHANG Chenyu, et al. Coordinating voltage regulation for AC-DC hybrid distribution network with multiple power electronic transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(2): 35-43.
- [8] 涂春鸣, 栾思平, 肖凡, 等. 基于下垂移相的三端口直流能量路由功率协调控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 4105-4114.
TU Chunming, LUAN Siping, XIAO Fan, et al. A coordinated power control strategy of three-port DC energy router based on droop phase-shift[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 4105-4114.
- [9] LEE M, CHOI W, KIM H, et al. Operation schemes of inter-connected DC microgrids through an isolated bi-directional DC-DC converter[C]//2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC). Charlotte, NC, USA: IEEE, 2015: 2940-2945.
- [10] 艾欣, 荣经国, 吕正, 等. 一种新型的能量路由器结构及其控制策略的研究[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1202-1210.
AI Xin, RONG Jingguo, LÜ Zheng, et al. Research on structure and control strategy of a novel energy router[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1202-1210.
- [11] WANG P, JIN C, ZHU D X, et al. Distributed control for autonomous operation of a three-port AC/DC/DS hybrid micro-grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 1279-1290.
- [12] 袁义生, 唐喆. 智能配电网电压跌落下的电力电子变压器运行研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 44-49.
YUAN Yisheng, TANG Zhe. Research on PET in smart distribution network under voltage sag[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 44-49.
- [13] 孔力, 裴玮, 叶华, 等. 交直流混合配电系统形态、控制与稳定性研究[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(9): 1-10.
KONG Li, PEI Wei, YE Hua, et al. Review of pattern, control and stability for hybrid AC/DC distribution power systems[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(9): 1-10.
- [14] 张海波, 袁志昌, 赵宇明, 等. VSC-MTDC系统变载距直流电压下垂控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 60-64.
ZHANG Haibo, YUAN Zhichang, ZHAO Yuming, et al. Variable intercept DC-voltage droop control for VSC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 60-64.
- [15] 罗永捷, 李耀华, 王平, 等. 多端柔性直流输电系统直流电压自适应下垂控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2588-2599.
LUO Yongjie, LI Yaohua, WANG Ping, et al. DC voltage adaptive droop control of multi-terminal HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2588-2599.
- [16] GHALEBANI P, NIASATI M. A distributed control strategy based on droop control and low-bandwidth communication in DC microgrids with increased accuracy of load sharing[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 40: 155-164.
- [17] 王云, 刘东, 翁嘉明, 等. 电网信息物理系统建模与仿真验证平台研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 130-136, 349.
WANG Yun, LIU Dong, WENG Jiaming, et al. The research of power CPS modeling and simulation verification platform[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 130-136, 349.
- [18] 汤奕, 王琦, 邵伟, 等. 基于OPAL-RT和OPNET的电力信息物理系统实时仿真[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 15-21, 92.
TANG Yi, WANG Qi, TAI Wei, et al. Real-time simulation of cyber-physical power system based on OPAL-RT and OPNET[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 15-21, 92.
- [19] 许加柱, 韦杰, 潘宏杰, 等. 基于双主动桥输入输出电流协调控制的二次纹波电压抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 70-77.
XU Jiazhu, WEI Jie, PAN Hongjie, et al. Secondary ripple voltage suppression strategy based on coordinated control of input and output currents for dual active bridge[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 70-77.
- [20] 高爽, 盛万兴, 徐斌, 等. 含分布式光伏的多级变电压交直流混合配电网经济性评估[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1520-1528.
GAO Shuang, SHENG Wanxing, XU Bin, et al. Economic evaluation of multi-voltage hybrid AC/DC distribution networks with high penetration of photovoltaics[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1520-1528.

作者简介:



刘科研

刘科研(1978—),男,河南郑州人,教授级高级工程师,博士,通信作者,研究方向为配电网建模仿真与智能分析(E-mail: liukeyan@epri.sgcc.com.cn);

盛万兴(1965—),男,河南信阳人,教授,博士研究生导师,研究方向为配电网运行与控制、分布式发电和微电网关键技术等(E-mail: wxsheng@epri.sgcc.com.cn)。

(编辑 陆丹)

(下转第87页 continued on page 87)

LI Hongmei, WAN Qiulan, XIANG Changming. Wind farm equivalence method considering wind speed[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 121-123, 159.

[18] 叶小岭, 陈浩, 郭晓杰, 等. 基于风速升降特征的短期风电功率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 56-62.

YE Xiaoling, CHEN Hao, GUO Xiaojie, et al. Short-term wind power prediction based on the UP-DOWN-features of wind speed[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 56-62.

作者简介:



杨 茂

杨 茂(1982—),男,吉林吉林人,教授,博士,主要研究方向为新能源并网及电力系统稳定性分析(E-mail: yangmao820@163.com);

代博社(1996—),男,吉林吉林人,硕士研究生,主要研究方向为风电功率预测(E-mail: daibozhi123@163.com)。

(编辑 王锦秀)

Modeling error analysis of wind speed-wind power curve for wind farm based on Bins method

YANG Mao, DAI Bozhi

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: When wind power is predicted with the predicted wind speed as the input, the modeling accuracy of wind speed-wind power curve for wind farm is vital important. A modeling method of wind speed-wind power curve for wind farm is proposed based on Bins method, and the variation condition of modeling error under different wind speed intervals is analyzed. The analysis results show that ignoring the difference of wind speed-wind power transmutation characteristics leads to higher modeling curves when wind speed is small and lower modeling curves when wind speed is large, while ignoring the spatial dispersion of wind speed has the opposite effect on modeling curves, so the influence of the two factors on modeling accuracy has obvious offset phenomenon, and the variation condition of each modeling error is closely related to wind speed.

Key words: wind speed; wind power; modeling error; transmutation characteristics; spatial dispersion; Bins method

(上接第 72 页 continued from page 72)

Photovoltaic consumption strategy across multiple transformer districts based on PET under cyber physical system

LIU Keyan¹, SHENG Wanxing¹, ZHAO Pengjie², YE Xueshun¹, WU Junyong², SUN Anguo²

(1. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China;

2. Suzhou Headline Electric Technology Co., Ltd., Suzhou 215131, China)

Abstract: The access of high proportion of PV (PhotoVoltaic) to low voltage distribution network can easily lead to problems of power flow inversion and voltage out-of-limit. In the AC/DC distribution network based on PETs (Power Electronic Transformers), PV consumption can be realized through the mutual power between PETs, which can effectively reduce the probability of power flow inversion and voltage out-of-limit. How to coordinate the interactive power is the key problem. Centralized control of distribution network CPS (Cyber Physical System) can realize optimal allocation, but it is difficult to guarantee communication quality in the large-scale distribution network. Therefore, a DBAC (improved Droop characteristics-based Bi-mode Adaptive Control) method is proposed, which takes DC bus voltage as global variable and PET's port state of transformer district as local variable. The smooth switch between the sending and receiving power modes of PET port is realized by introducing the transfer factor. The unbalanced factor is introduced to realize the allocation of photovoltaic power among receiving transformer districts according to demand. Even if without communication across multiple transformer districts and centralized control, PET power coordination can be realized. The distribution network CPS simulation platform composed of advanced distribution network simulator, OPNET and distribution master station is built, and the cyber physical model of AC/DC distribution network based on PET is established to verify the correctness and effectiveness of the proposed strategy. The results of simulation example show that the proposed DBAC method can realize the high proportion of PV consumption across multiple transformer districts.

Key words: power electronic transformer; photovoltaic consumption; droop characteristics; mutual power; cyber physical system; AC/DC distribution network

附录

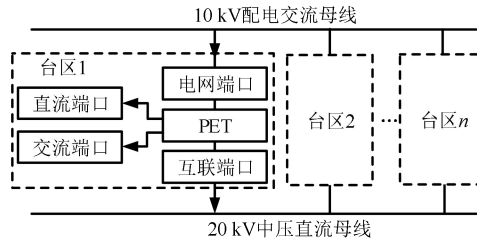


图 A1 多台区互联的交直流配电网

Fig.A1 AC/DC distribution network with multiple interconnected transformer districts

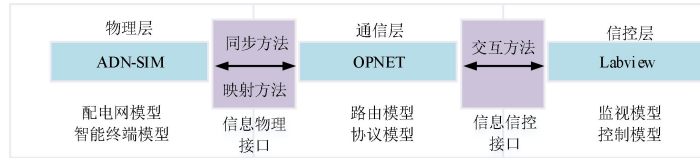


图 A2 配电网 CPS 综合仿真平台

Fig.A2 CPS integrated simulation platform for distribution network

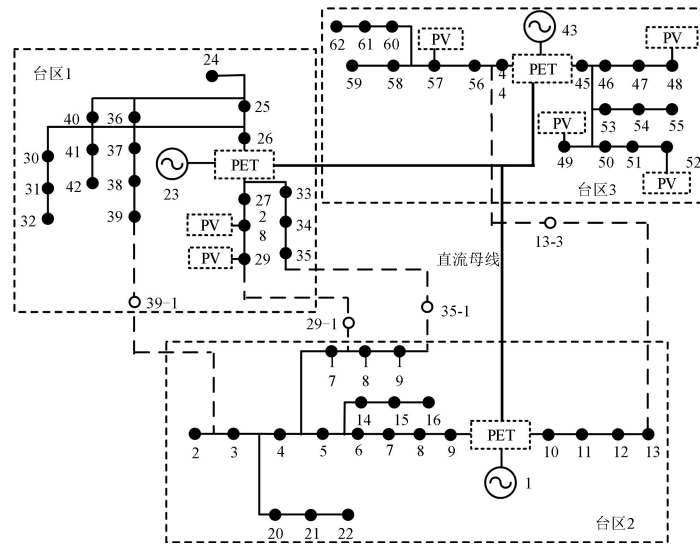


图 A3 基于 PET 的三台区互联的交直流配电网

Fig.A3 AC/DC distribution network with three interconnected transformer districts based on PET

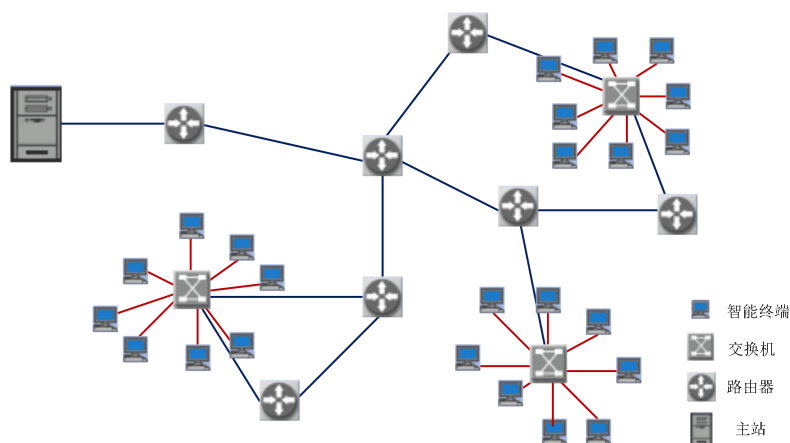


图 A4 交直流配电网的通信网络模型

Fig.A4 Communication network model of AC/DC distribution network

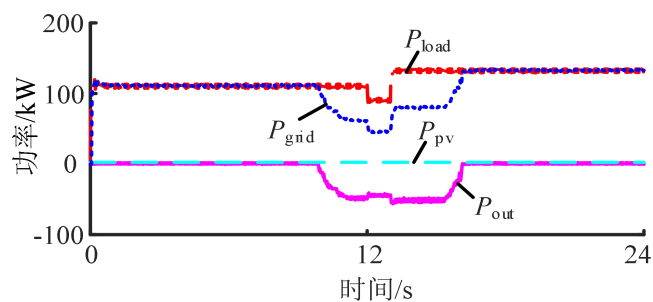


图 A5 基于 DBAC 方法的台区 2 的功率流动情况

Fig.A5 Power flow of transformer district 2 based on DBAC method

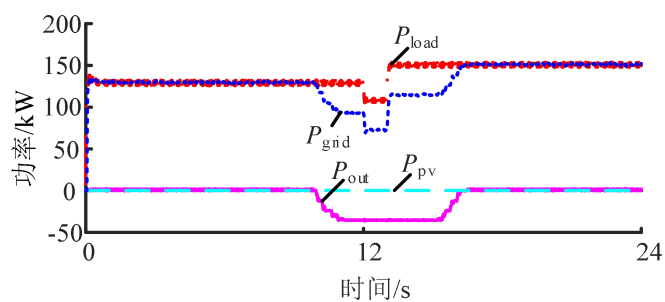


图 A6 基于下垂控制方法的台区 2 功率流动情况

Fig.A6 Power flow of transformer district 2 based on droop control method

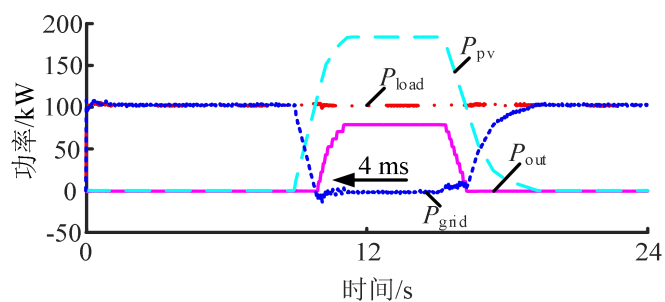


图 A7 算例 4 中台区 1 的功率流动情况

Fig.A7 Power flow of transformer district 1 in Case 4

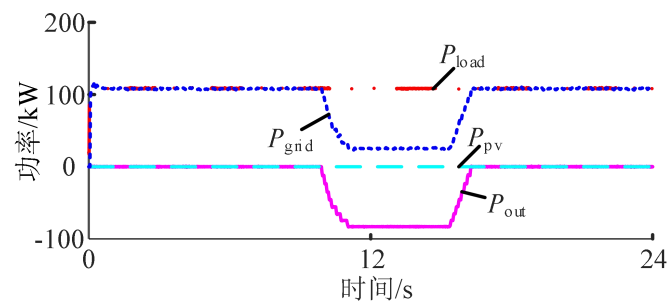


图 A8 算例 4 中台区 2 的功率流动情况

Fig.A8 Power flow of transformer district 2 in Case 4