

含“光储直柔”的新型低压配用电系统 控制策略研究

蒙媛,姚柯祺,何军,崔键祥,辜超,方钟升
(国网四川省电力公司广安供电公司,四川广安 638500)

摘要:在“双碳”目标驱动下,为适应高比例可再生能源和高比例电力电子设备的新型电力系统“双高”结构,研究基于光伏发电、储能、直流配电、柔性用电于一体的新型低压配用电系统具有重要意义,这是实现新能源发电消纳、促进用户灵活用电的重要途径。在此背景下,提出了一种“光储直柔”低压配用电系统控制策略。首先,建立了“光储直柔”系统的基本架构,分析了该系统的工作原理、基本结构和功率分配策略;然后,针对高比例可再生能源及电力电子装置接入的配用电系统场景,分别研究了“光储直柔”系统各部分的关键技术及控制策略;最后,通过仿真验证该系统在不同运行环境下具有良好的响应能力和稳定性。

关键词:光储直柔; 新能源消纳; 新型低压配用电系统; 分布式光伏; 控制策略

中图分类号:TM 72 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2024)06-0035-09

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240605

Research on Control Strategy for New Low-voltage Power Distribution and Utilization System with PEDF

MENG Yuan, YAO Keqi, HE Jun, CUI Jianxiang, GU Chao, FANG Zhongsheng
(State Grid Guang'an Electric Power Supply Company, Guangan 638500, Sichuan, China)

Abstract: Driven by the "carbon peaking and carbon neutrality" goal, and in order to adapt to the "double high" structure of new power system with a high proportion of renewable energy and a high proportion of power electronic equipment, it is of great significance to study the new low-voltage power distribution and utilization system based on photovoltaics, energy storage, direct current and flexibility (PEDF), which is an important way to realize the consumption of renewable energy power generation and promote the flexible use of electricity by users. Against this background, the low-voltage power distribution and utilization system with PEDF is proposed. First of all, the basic structure of PEDF system is established, and the working principle, basic structure and power allocation strategy are analyzed. And then, for the scenario of integration of a high proportion of renewable energy and power electronic device to power distribution and utilization system, the key technologies and control strategies of each part of PEDF system are studied separately. Finally, through the example verification, the proposed system has good response capability and stability under different operating environment.

Key words: photovoltaics, energy storage, direct current and flexibility (PEDF); renewable energy consumption; new low-voltage power distribution and utilization system; distributed photovoltaic; control strategy

0 引言

目前,有大量分布式光伏、储能电源、柔性负荷等设备接入配电网^[1]。在高比例可再生能源和高比例电力电子装置的新型电力系统背景下,传统的交流配电网面临着一系列问题,例如电力潮流变化、

电能质量下降、谐振等问题^[2]。此外,在“双碳”目标驱动下,电气化也成为未来建筑领域的发展趋势^[3],通过提高配用电系统的灵活性、高效性和可靠性,以适应配用电系统源网荷储多元化的背景。因此,传统电力系统正向着智能化的直流模式发展^[4]。

光储直柔(photovoltaic, energy storage, direct current and flexibility, PEDF)系统是集成分布式光伏发电、分

布式储能、直流配电网和柔性负荷于一体的系统,具有典型的储用一体化、直流供电和灵活用电的特点。PEDF 系统的应用大大提高了可再生能源的利用率,降低了电力能耗和环境污染,可为社会节能减排带来可观的效益,是实现“双碳”目标的重要环节。目前,关于 PEDF 系统的拓扑架构及控制策略已有一定的研究。文献[5]详细分析了 PEDF 的必要性、设计架构及优势。文献[6]构建了新一代 PEDF 直流建筑的标准体系,设计并研究了基于 PEDF 系统的直流建筑标准的层次架构。文献[7]总结了当前 PEDF 系统的应用案例,展望了未来新型电力系统的研究方向。文献[8]提出了一种确定直流配电网电压等级序列的方法,为未来制定电压等级标准提供了理论依据。为提升 PEDF 系统的电压稳定性,文献[9]提出了一种基于虚拟惯性功率分配的电力系统辅助调频策略,可有效提高系统电压稳定性及抗扰动能力。针对 PEDF 系统中新能源与柔性负荷的产、用能不匹配问题,文献[10]以柔性负荷为目标导向,提出了一种基于虚拟储能系统的调度策略。针对轨道交通领域,文献[11]提出了适用于轨道交通的 PEDF 系统技术,并研究了技术的应用现状及发展趋势;文献[12]提出了配电台区柔性直流互联系统,基于融合终端对配电台区内柔性负荷进行了配置设计,保障了多元源荷的可靠接入。针对低压直流配电网,文献[13]研究了直流配电网的柔性电压控制策略,以应对直流配电网中的功率波动问题;文献[14]根据交直流混合微电网的特点,建立了考虑碳排放成本的 AC/DC 混合微电网优化运行模型;文献[15]考虑了配电网源荷特性,提出了直流配电网优化配置方法,为量测装置接入提供了参考。基于电力电子化设备大量接入配电网的现状,文献[16]提出了交直流混联配电网电压优化方法,有效降低了配电网电压波动。

现有文献大多关注于 PEDF 系统的基本网络架构及整体模型的研究。然而,高比例新能源接入下的配用电系统具有随机性和时变性特征,对于不同外界环境下 PEDF 系统的适应性研究仍需深入。此外,关于系统各部分的协同控制策略及数学模型的研究也相对较少。

因此,下面基于高比例新能源接入的配用电系统场景,研究了 PEDF 系统的拓扑结构、功率分配策略及控制原理,并研究了 PEDF 系统在不同外界环

境下的适应性。与传统配用电系统相比,所提 PEDF 系统贡献如下:

1) 系统适应性研究。针对高比例新能源接入的配用电系统场景,提出了 PEDF 系统的拓扑结构、工作机理及功率分配策略,并探讨了系统在不同外界环境下的适应性。

2) 关键技术与控制策略。分别研究了分布式光伏系统、储能系统、换流器系统、柔性负荷的关键技术及控制策略,为系统的协同配合提供了基础。

3) 多场景验证。在不同的外界环境场景下,验证了所提出 PEDF 系统具有良好的稳定性及适应性,证明了系统的可行性和有效性。

1 PEDF 系统结构及工作原理

1.1 PEDF 系统结构设计

PEDF 系统结构主要由典型交直流配电网的拓扑结构组合转换而成,其结构变化与系统中接入的各种负荷、分布式电源及换流器相关,所提 PEDF 系统如图 1 所示。

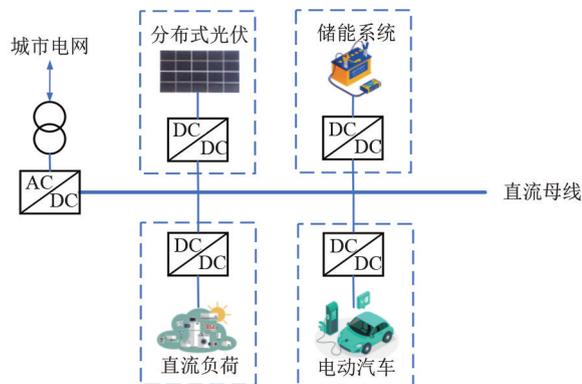


图 1 PEDF 配用电系统结构

1.2 含 PEDF 系统的配用电功率分配策略

传统配用电系统主要解决电网供电与负荷用电两者之间的关系,而采用 PEDF 系统技术需要解决电网供电、分布式能源、储能系统以及负荷用电之间的协同关系。

电网根据 PEDF 系统的功率供需情况,通过功率灵活互动实现功率平衡。

$$P_{\text{grid}} + P_{\text{pv}} = P_{\text{load}} + P_{\text{es}} + P_{\text{ev}} + P_{\text{loss}} \quad (1)$$

式中: P_{grid} 为电网输出功率,电网向系统发出功率时为正值,吸收功率时为负值; P_{pv} 为分布式光伏并网功率; P_{load} 为系统中负荷用电量; P_{es} 为储能系统并网

功率; P_{ev} 为电动汽车并网功率; P_{loss} 为功率传输时的损耗。

因此,PEDF系统直流母线的馈入功率为 $P_{grid}+P_{pv}$,其中 P_{grid} 由DC/AC换流器控制, P_{pv} 由分布式光伏产生。为了实现功率平衡,在一定范围内的可变直流母线电压 U_{dc} 是协调系统中所有设备的控制信号。PEDF系统的典型运行状态如下:

1) 稳定状态:当总负荷(包括所有电器、电动汽车和储能系统)的功率可以满足 $P_{grid}+P_{pv}$,且 U_{dc} 在限定范围内(即 $U_{dc,min}<U_{dc}<U_{dc,max}$)时,系统运行平稳。

2) 重载状态:当总负荷大于 $P_{grid}+P_{pv}$ 时, U_{dc} 下降。各设备需对电压下降做出响应,并根据其控制策略相应减少负载。此时,电动汽车和储能系统可降低充电功率,或者切换到放电模式,总负荷减小到接近于 $P_{grid}+P_{pv}$ 。如果 $P_{grid}+P_{pv}$ 过低,可通过AC/DC转换器增加馈电功率,即从城市电网获得功率以稳定 U_{dc} 至 $U_{dc,min}$ 。

3) 轻载状态:总负荷低于 $P_{grid}+P_{pv}$ 时, U_{dc} 上升。各设备对电压上升作出响应,并根据其控制策略相应增加负载。此时,电动汽车和储能系统可提高充电功率,总负荷增加到接近 $P_{grid}+P_{pv}$ 。如果 $P_{grid}+P_{pv}$ 过高,分布式光伏通过向负荷供电输出电能,并向储能系统充电,剩余功率并入城市电网,以稳定 U_{dc} 至 $U_{dc,max}$ 。

基于上述典型运行状态,PEDF系统的主要特点如下:

1) PEDF系统不是光伏系统、储能系统和直流电器的简单集合,而是通过能源的双向灵活互动实现柔性控制,基于直流母线电压的各设备分布式控制策略起着至关重要的作用。

2) PEDF系统改变了传统输配电的策略,由“自上而下”(即主要由集中电厂发电,再分配给终端用户)转变为“自下而上”(即分布式光伏、风电先由终端用户自用,剩余再输往电网)。

3) 将PEDF系统视为电网可调度的能量柔性节点,可以实现功率削峰填谷,并有助于在高渗透率新能源并网时充分利用可再生能源。

2 PEDF系统的关键技术

分布式光伏系统、储能系统、直流柔性负荷及城

市电网共同为PEDF系统提供功率。其中,分布式光伏通过升压斩波电路为系统提供电能,并实现最大功率追踪(maximum power point tracking, MPPT);储能系统通过升降压双向斩波电路向系统馈入或吸收电能,从而使系统保持稳定的直流电压;直流负荷通过直流母线接入系统使用电能,其柔性负荷可通过需求侧响应等技术对功率进行调控。分布式光伏系统、储能系统及直流负荷三部分最后通过DC/AC逆变电路及相应的控制策略并入城市电网,且城市电网可通过AC/DC整流电路为配电系统供电。

2.1 分布式光伏系统工作原理及控制策略

2.1.1 光伏电池等效电路及运行原理

单一的光伏电池通过串并联,组成了分布式光伏组件。光伏电池由半导体PN结组成,基于光生伏特效,将太阳光照射下的光能转化为电能,光伏电池的等效电路如图2所示。图中: I_{ph} 为光生电流,取决于光伏电池温度、光照辐射度及表面积; I_d 为暗电流,当没有外界光照时,在外部电压作用下暗电流通过PN结; R_s 为串联电阻,通常小于 $1\ \Omega$; R_{sh} 为并联电阻,通常为几千欧姆; I_L 为负载电流; U_{oc} 为开路电压,其值与环境温度成反比,与光照辐射度成正比。

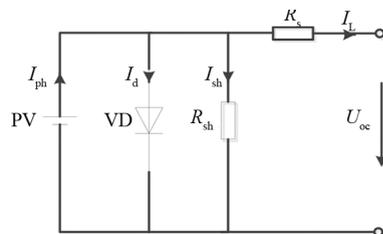


图2 光伏电池等效电路

光伏电池等效电路中输出电流可表示为

$$I_L = I_{ph} - I_{sat} \left\{ \exp \left[\frac{q(U_{oc} + I_L R_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{U_{oc} + I_L R_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

式中: I_{sat} 为二极管的反向饱和电流; k 为玻尔兹曼系数,其值为 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; q 为电荷量,其值为 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$; T 为温度; A 为二极管理想因子。通过将光伏电池逐级串并联安装,则可组成光伏阵列,发电规模将进一步扩大,如图3所示。

光伏阵列输出电压及功率与串并联光伏电池数量有关,分别通过串联和并联扩大输出电压和电流。若理想状态下各光伏电池输出电流和电压分别为 I_s

和 U_s , 将 N 个光伏电池串联形成光伏电池链, 继续将 M 串光伏电池链并联连接, 则此时光伏阵列输出电流和电压分别为 MI_s 和 NU_s , 实现了光伏输出功率的扩大。

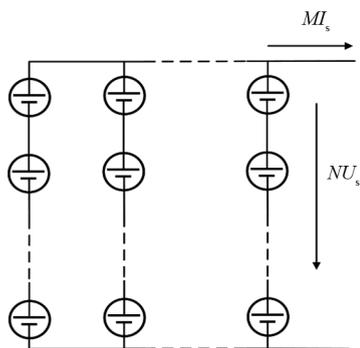


图 3 光伏阵列结构

2.1.2 分布式光伏 MPPT 技术

光伏电池作为非线性电源, 其工作特性与外界环境有关, 输出功率受光照强度和环境温度的影响较大。在环境温度和光照时刻改变的外界条件下, 为了使光伏电池可以时刻输出最大功率, 需要设置 MPPT 控制策略, 可以找出光伏电池的最佳工作状态, 最大效率实现能量转换。通过在 DC/DC 转换电路中控制电力电子开关, 实现 MPPT 控制。分布式光伏系统的电路原理如图 4 所示。图中: r 为光伏电池内阻; E_1 为光伏电池电动势; R_L 与 R' 分别为系统负载与系统等效阻抗。

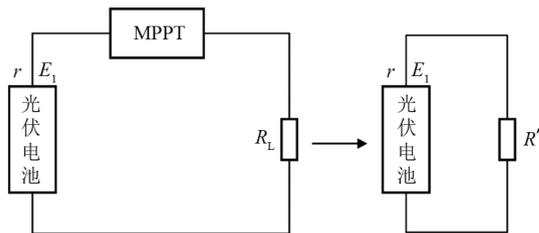


图 4 分布式光伏系统电路原理

由图 4 所示, 光伏电池输出功率可表示为

$$P = \left(\frac{E_1}{r + R_L} \right)^2 R_L \quad (3)$$

将 E 与 r 看作常数, 将式(3)两端对 R_L 求导, 可得

$$\frac{dP}{dR_L} = \frac{r - R'}{(r + R')^3} E_1^2 \quad (4)$$

由式(4)可得: 当系统等效阻抗 R' 与光伏电池内阻 r 的值相等时, 即 $dP/dR_L = 0$, 光伏系统可以输出最大功率。因此, MPPT 控制策略通过调节 DC/DC 升压斩波电路的占空比, 使系统等效电路与电池内阻匹配。常用的分布式光伏 MPPT 控制策略有恒定

电压法、扰动观察法、电导增量法等。光伏电池输出电压与功率的关系如图 5 所示。图中, U_{MPP} 为最大功率点(maximum power point, MPP)对应的输出电压。扰动观察法通过对光伏电池输出电压增加扰动, 根据光伏电池输出功率的变化趋势, 将干扰值的方向进行改变, 最终使光伏电池工作在 MPP 点。

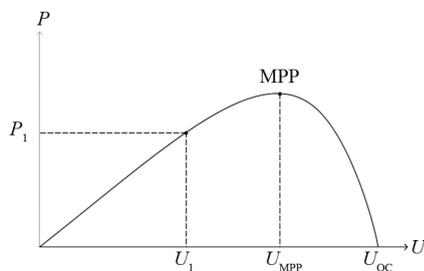


图 5 光伏电池 MPPT 控制原理

电导增量法通过光伏电池的输出功率电压特性关系, 得到电导与电导变化率之间的关系, 即对功率表达式进行微分。

$$\frac{dP}{dU} = U + U \frac{dI}{dU} \quad (5)$$

MPP 点的 $dP/dU = 0$, 即 $dI/dU = -I/U$, 通过比较电导与电导变化率, 调整控制信号, 使光伏电池工作于 MPP 点。

MPPT 控制主要在 DC/DC 电路中实现, 通过控制电力电子器件的通断, 使得光伏系统等效负载与输出特性相匹配, 从而输出最大功率。考虑 DC/DC 电路的转换效率和并网要求, DC/DC 电路采用升压斩波电路, 如图 6 所示。其中: 开关器件 V 控制电路的工作状态; 电感 L 对能量进行储存; 二极管 VD 决定电感与负载间电能的传输方向; 电容 C 用于保持输出电压。

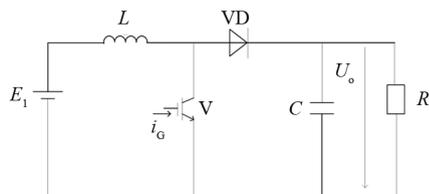


图 6 升压斩波电路

1 个稳态工作周期内, 电感存储与释放的能量相等, 即

$$E_1 I_L t_{on} = (U_o - E_1) I_L t_{off} \quad (6)$$

式中: t_{on} 为开关器件导通时间; t_{off} 为开关器件关断时间。对式(6)化简可得

$$U_o = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} E = \frac{T}{t_{off}} E \quad (7)$$

式中, T 为一个开关周期。由于 T 大于 t_{off} , 电路输出电压始终大于电源电压, 从而实现升压。忽略电路中的损耗, 电路输入与输出侧功率相同, 则

$$EI = U_o I_o \quad (8)$$

式中, I 与 I_o 分别为输入与输出电流的平均值, 则可以得到

$$\frac{I_o}{I} = \frac{E}{U_o} = 1 - \frac{t_{on}}{T} = 1 - D \quad (9)$$

因此, 电路等效输入阻抗 r 与负载 R 的关系为

$$r = \frac{E}{I} = \frac{U_o}{I_o} (1 - D)^2 = R (1 - D)^2 \quad (10)$$

式中, D 为占空比。因此, 通过改变开关器件开断的占空比可改变直流斩波电路的输入阻抗, 从而匹配相应的负载阻抗, 实现 MPPT 功能。

2.2 储能系统工作原理及控制策略

新能源输出功率具有随机性与波动性, 当并网比例较高时, 会对电网的稳定性、可靠性造成影响。因此, 在集群分布式光伏的安装地点, 通常安装储能装置来消纳新能源输出功率。此外, 储能装置在直流系统中, 可以有效稳定直流母线电压、平滑新能源功率输出。

分布式光伏、直流柔性负荷及储能装置通过直流母线连接时, 各装置的电压等级需要与直流母线一致, 因此需要相应的直流装置对各部分电压进行变换。其中, 储能系统能够实现能量的双向交互, 在双向斩波电路中通过改变控制策略实现充放电模式的切换。

2.2.1 储能电池数学模型

蓄电池组级联构成了储能单元, 用电压源与定值电阻串联后构成蓄电池数学模型。该模型较好地解释了蓄电池的物理特性, 其戴维宁等效电路模型如图 7 所示。

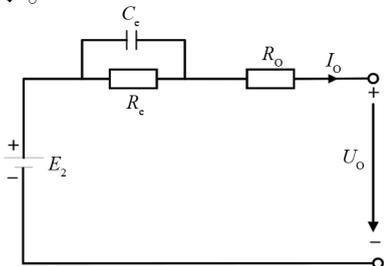


图7 蓄电池等效数学模型

图中: E_2 为蓄电池电动势; C_c 和 R_c 分别为蓄电池的极化电容和电阻, 用于表示蓄电池电化学极化特性; I_o 和 U_o 分别为蓄电池端口电流和电压。当蓄电池充放电时, 荷电状态为

$$S_{OC} = Q_r / Q_n \quad (11)$$

式中: S_{OC} 为蓄电池的荷电状态; Q_n 与 Q_r 分别为蓄电池的额定容量和剩余容量。蓄电池充放电时, t 时刻的荷电状态为

$$S_{OC,t} = S_{OC,t_0} + \frac{1}{Q_n} \int_{t_0}^t I_o dt \quad (12)$$

式中, S_{OC,t_0} 为蓄电池初始时刻的荷电状态。当蓄电池处于充电状态时, 电流 I_o 为正数; 当处于放电状态时, 电流 I_o 为负数。

2.2.2 储能系统双向斩波电路工作原理

储能系统功率具有双向流动性, 通过双向斩波电路与直流母线连接, 可以实现升降压功能。当 PEDF 系统直流母线电压升高时, 电路工作在降压模式, 蓄电池充电, 功率由直流母线流入储能系统; 当直流母线电压降低时, 电路工作在升压模式, 功率由储能系统馈入直流母线, 蓄电池放电。双向斩波电路结构如图 8 所示。图中: L_1 为滤波电感; C_1 和 C_2 为两端滤波稳压电容; U_1 和 U_2 分别为蓄电池侧电压和直流母线电压; V_1 和 V_2 为开关器件。

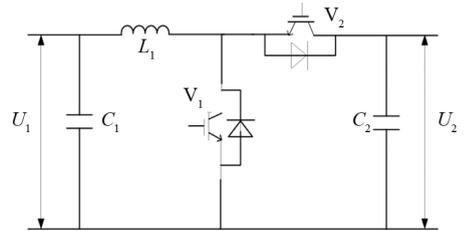


图8 双向斩波电路拓扑结构

电路处于降压工作状态时, V_1 为续流管, V_2 为开关管; U_2 为输入电压, U_1 为输出电压。 V_2 导通时, U_2 通过 V_2 为电感存储功率, 蓄电池充电; V_2 关断时, 电感电流不能突变, 因此续流二极管 V_1 使电感电流方向不变, 电感的电压值为蓄电池侧电压值的负数。

电路处于升压工作状态时, V_1 为开关管, V_2 为续流管; U_1 为输入电压, U_2 为输出电压。 V_1 导通时, U_1 施加在电感两端, 此时电感电压为蓄电池直流侧电压; V_1 关断时, 电感电流不能突变, 因此续流二极管 V_2 使电感电流方向不变, 电感的电压值为蓄电池直流侧电压与直流母线电压差值。

2.3 柔性负荷特性分析

在分时电价等政策的引导下,柔性负荷可以通过改变用电时间及开关通断,获得一定经济效应。例如,以高载能负荷为代表的传统工业负荷,根据电网电价变化来调节用电时间;以电动汽车为代表的新型负荷,根据电网调度需求或实时电价来调节用电行为。对各类柔性负荷分类如图 9 所示。

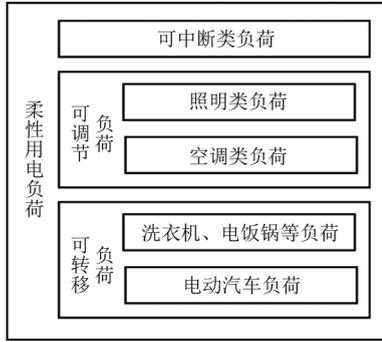


图 9 柔性负荷结构组成

柔性负荷可分为可中断类负荷、可调节负荷与可转移负荷,其中:可中断类负荷是一种通过智能插座参与需求侧响应的柔性负荷;可调节负荷在电价激励的作用下可以减少部分电能消耗;可转移负荷在电价激励的作用下可以转移用电时间,对用电时段进行调整。

2.4 换流器系统工作原理及稳态控制策略

PEDF 系统直流母线通过 DC/AC 双向换流器与城市电网连接,图 10 为换流器拓扑结构。其中,有功功率受到外界环境的直接影响,当配电网电压值发生变化时,有功功率无法立即做出相应调整。为解决该问题,需采用适当的换流器控制策略。

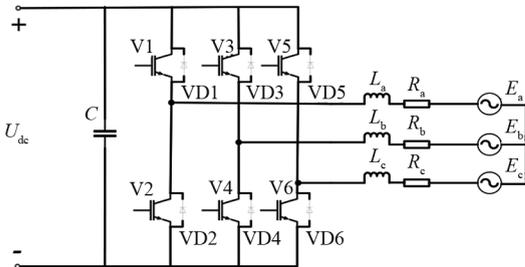


图 10 DC/AC 双向换流器拓扑结构

由于无法直接通过控制策略来调节功率传输,因此采用一种间接的方法,即通过调整并网点的电压值和电流值,来间接地控制功率传输。直流母线电能通过 DC/AC 换流器接入城市电网,为了便于控制功率传输,采用如图 10 所示的三相桥式电压型换流电路。

为了简化控制系统,采用派克变换的方法进行坐标变换。将静止三相 abc 坐标系转换到同步速旋转的 dq 坐标系中。通过这种变换,可以将三相交流量转换为两相直流 dq 坐标系,从而降低控制系统的复杂性。

在旋转 dq 坐标系下,有功功率和无功功率表示为

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{3}{2} e_d i_d \\ q &= \frac{3}{2} e_d i_q \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: e_d 为并网点电压的 d 轴分量; i_d 为并网点电流的 d 轴分量; i_q 为并网点电流的 q 轴分量。当系统处于稳定状态,即 e_d 保持稳定时,有功功率与 i_d 呈正相关,而无功功率与 i_q 呈正相关。为了实现对有功功率和无功功率的有效控制,可以通过控制直流侧电压 U_{dc} 以及 i_q 来实现。

换流器的控制策略采用双环控制,如图 11 所示。外环控制主要包括直流电压和无功功率的负反馈调节,通过 PI 控制环节可以得到并网电流在 dq 轴上的分量参考值。内环控制主要针对有功电流 i_d 和无功电流 i_q 进行调节,将外环控制得到的电流 dq 轴分量参考值引入到内环控制中。将并网点电压的 dq 分量参考值进行派克反变换,以获取并网点三相交流电压的参考值,通过正弦脉宽调制 (sinusoidal pulse width modulation, SPWM) 控制,生成逆变电路开关管的控制信号,从而实现对系统的精确调控。

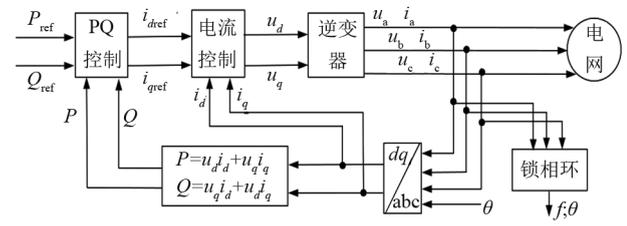


图 11 DC/AC 双向换流器控制策略

3 仿真分析

3.1 PEDF 系统仿真模型搭建

基于 PSCAD/EMTDC 对 PEDF 配用电系统进行搭建,将分布式光伏、储能系统和直流负载并联到直流母线上,经过 DC/AC 换流器接入电网。

结合实际交流系统的特点,对 PEDF 系统参数进

行合理设置:交流电压为 10 kV,容量为 100 MVA;直流负荷容量为 150 kW,其中 50 kW 负荷可投切;分布式光伏通过升压斩波电路接入直流母线,通过 MPPT 控制实现最大功率追踪;储能系统通过双向 DC/DC 斩波电路接入直流母线,采用双闭环控制;DC/AC 换流器采用基于电压外环与电流内环的双闭环控制,连接潮流测量装置,设交流侧流向直流侧的功率方向为正方向。

3.2 仿真结果分析

3.2.1 稳态状况仿真分析

设置仿真参数:直流母线电压为 800 V;环境光照强度为 1000 W/m^2 ,温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$;光伏输出功率为 50 kW,负载功率为 150 kW,蓄电池放电输出功率为 50 kW,蓄电池工作在定功率模式。稳态下母线电压以及电网、分布式光伏输出功率分别如图 12 至图 14 所示。

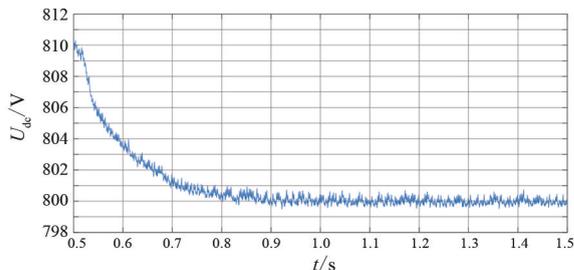


图 12 稳态下直流母线电压波形

由图 12 可见,稳态时直流母线维持在 800 V,系统在 0.80 s 之后达到稳态。

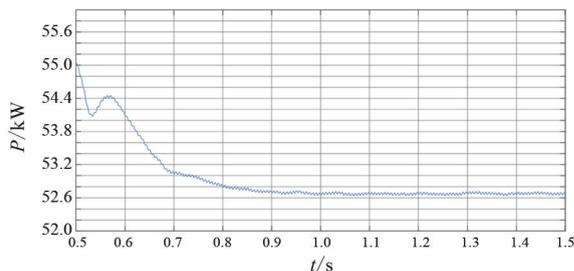


图 13 稳态电网输出功率

由图 13 可见,稳态状态下 PEDF 系统有 50 kW 的功率缺额,此时功率缺额由电网经换流器送入 PEDF 系统。

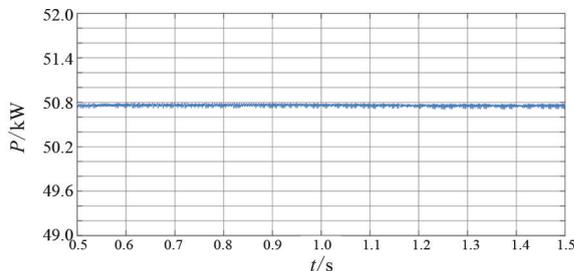


图 14 稳态光伏输出功率

由图 14 可见,光伏系统能够可靠地追踪到最大功率,证明了 PEDF 系统在稳定运行状态下的高效性和准确性。

3.2.2 外界环境变化时仿真分析

1)设置系统在 1.00 s 时,光照强度变为 500 W/m^2 ,其余运行状态与第 3.2.1 条的稳定状态相同。图 15 和图 16 分别为光照变化时光伏输出功率与母线电压变化曲线。

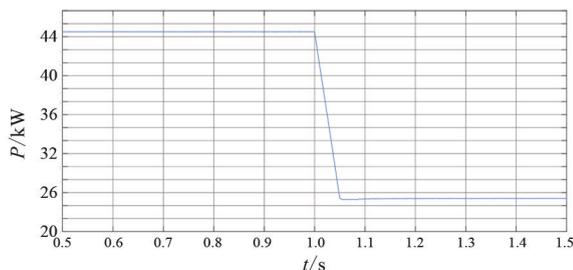


图 15 光照变化时光伏系统输出功率

由图 15 可见,由于光照突变,使得光伏系统输出功率降低至原功率值的一半,约在 1.05 s 后能够维持新状态工作,能够较快地完成功率追踪。

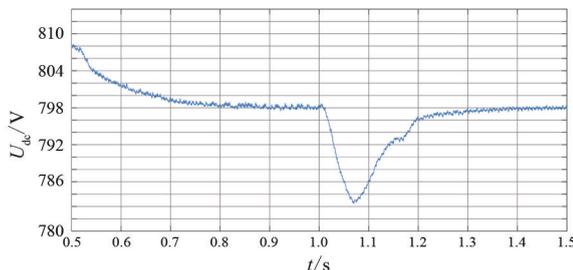


图 16 光照变化时直流母线电压波形

由图 16 可见,在 1.00 s 时光照变化瞬间,由于分布式光伏输出功率降低,系统功率出现缺额,此时系统直流母线出现短暂波动后,保持稳态工作。

2)设置系统在 1.00 s 时,环境温度变为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,其余运行状态与第 3.2.1 条的稳定状态相同。图 17 和图 18 分别为温度变化时光伏输出功率与母线电压变化曲线。

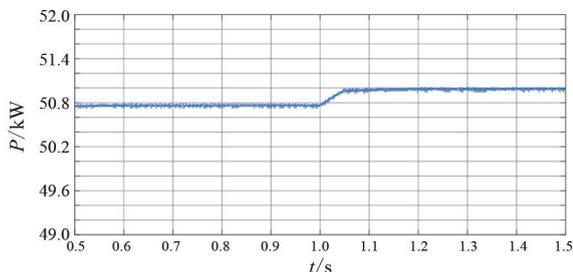


图 17 温度变化时光伏输出功率

由图 17 可见,当外界环境温度下降时,光伏系统输出功率略微上升,温度变化对光伏系统输出功率影响相对较小,此时光伏系统也能够较快完成功率追踪。

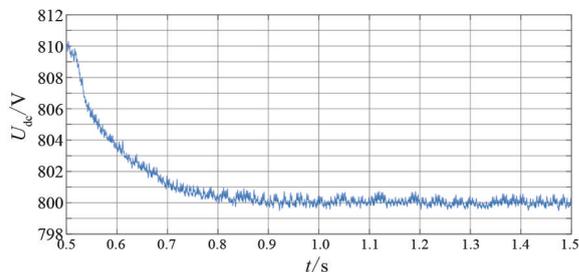


图 18 温度变化时直流母线电压波形

由图 18 可见,温度变化对直流母线电压影响较小,直流母线电压基本保持不变。

由图 15—图 18 可知,当外界环境发生变化时,光伏发电设备可自动调节运行状态。所提的 PEDF 系统具有较好的适应性,能够根据环境的变化做出及时响应,并通过所提控制策略,实时调整光伏发电的输出功率,提高能源利用效率,减少能源浪费。直流母线在短暂波动后,能够迅速恢复到稳态工作状态,表明所提出的 PEDF 系统具有较好的稳定性和自调节能力。

3.2.3 负荷变化仿真分析

为验证所提出的 PEDF 系统在负荷变化时的适应性和有效性,进行了负荷变化下的仿真分析。设置系统在 1.00 s 时投切直流负荷,使负荷容量由 150 kW 增加至 200 kW。图 19 和图 20 分别为负荷投入后电网输出功率和直流母线电压的变化曲线。

由图 19 和图 20 可见:负荷投入后,交流电网向 PEDF 系统输出功率增加;负荷投入瞬间,直流母线电压产生了一定波动,约在 1.40 s 处进入了稳态。由于负荷的投入,换流器直流侧电容进行放电,使得直流母线电压降低。负荷投入系统达到稳态后,交流电网为 PEDF 系统补充功率,系统功率得到平衡,直流母线电压进入稳态。从仿真结果可知:负荷变化后,PEDF 系统能够迅速调整功率分配,以满足增加的负荷需求;同时,直流母线电压可迅速恢复到稳定状态,证明了所提 PEDF 系统在负荷变化时的良好适应性和稳定性。PEDF 系统能够快速响应负荷变化,并保持稳定的运行状态,对于实际应用中的供电可靠性和电能质量具有重要意义。

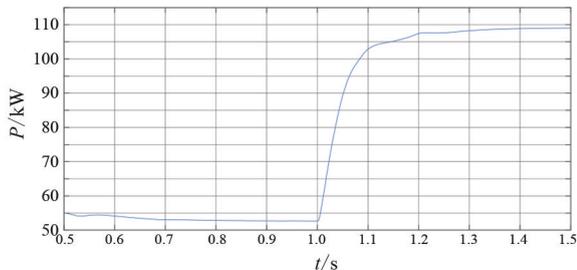


图 19 负荷变化时交流电网输出功率

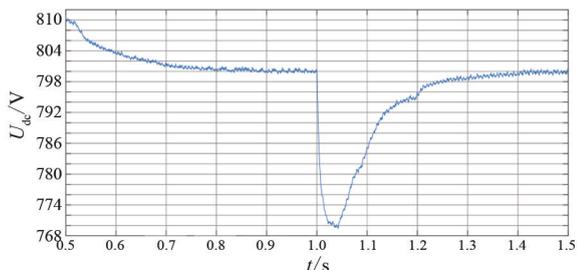


图 20 负荷变化时直流母线电压波形

3.2.4 储能系统充放电仿真分析

设置 1.00 s 前,储能系统位于放电状态,向系统输出 50 kW 功率;设置 1.00 s 后,储能系统位于充电状态,从系统吸收 50 kW 功率。图 21 和图 22 分别为储能系统充放电变化后交流电网输出功率和直流母线电压曲线。

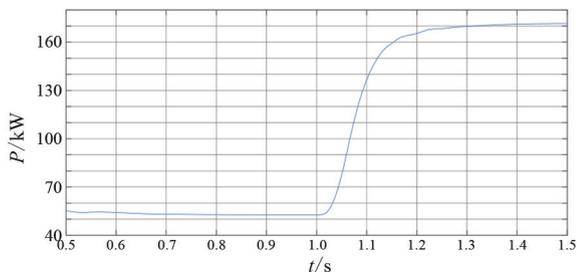


图 21 储能系统变化时交流电网输出功率

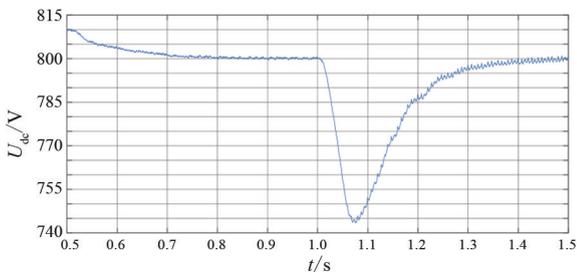


图 22 储能系统变化时直流母线电压波形

由图 21 和图 22 可见,由于储能系统由放电变为充电状态,交流电网经换流器向系统输出缺额的功率。在储能系统状态转换时,直流母线电压发生了一定扰动,在 1.40 s 后进入了稳态,实现了功率平衡。当储能系统从放电状态切换到充电状态时,交

流电网的输出功率迅速由 52 kW 增加至 172 kW,表明储能系统能够有效地吸收电网中的多余能量,并在需要时释放能量,从而实现能量的灵活调度和利用。在储能系统充放电变化的过程中,直流母线电压出现了一定的波动,但随后迅速恢复到稳定状态。仿真结果表明所提出的 PEDF 系统具有较好的稳定性和自调节能力,能够快速适应储能系统的充放电变化,并保持系统的稳定运行。

4 结论

在高渗透率可再生能源电网下,为了协调供需双方,上面提出了一种含 PEDF 的新型低压配用电系统控制策略,对低碳配用电的发展起到了一定的支撑作用,为新能源消纳提供了有效的解决方案。该系统综合考虑了分布式光伏系统、储能系统和柔性负荷,利用直流母线集成到低压配电网中。仿真结果表明,在各环境工况运行条件下,所提 PEDF 系统具有良好的响应能力和可靠性,证明了该系统控制策略的有效性和可行性,在运行灵活性、新能源消纳等方面具有一定优势。未来,随着新能源和电动汽车等新型负荷的快速增长,建设以 PEDF 系统为代表性的低碳新型电力系统具有重要意义。

参考文献

- [1] 鲁宗相,李海波,乔颖.含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J].电力系统自动化,2016,40(13):147-158.
- [2] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
- [3] 李叶茂,李雨桐,郝斌,等.低碳发展背景下的建筑“光储直柔”配用电系统关键技术分析[J].供用电,2021,38(1):32-38.
- [4] 郭昊旻.直流配电网可靠性分析及优化措施研究[D].南京:东南大学,2019.
- [5] WANG C, JIA X Y, LIU T, et al. Research progress on technology and standard of DC household appliances in PEDF building[C]// 2023 6th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), May 12-14, 2023, Guangzhou, China. IEEE, 2023: 307-316.
- [6] 王昊晴,刘宁,马钊,等.面向安全可靠用电需求的“光储直柔”直流建筑标准体系研究[J].供用电,2022,39(8):15-20.
- [7] MENG J H, WANG Y, FU C, et al. Adaptive virtual inertia control of distributed generator for dynamic frequency support in microgrid[C]//2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Sep. 18-22, 2016, Milwaukee, USA. IEEE, 2016:1-5.
- [8] 段建东,魏朝阳,周一,等.未来直流配电网电压等级序列研究[J].中国电机工程学报,2018,38(12):3538-3545.
- [9] 史梁.光储直柔系统虚拟惯性和辅助调频控制策略[D].秦皇岛:燕山大学,2022.
- [10] 王炳铮.基于光储直柔的建筑配电系统及调度策略研究[D].北京:北京建筑大学,2023.
- [11] 吴宗臻,王小锁,张凌云,等.轨道交通光储直柔技术应用及展望[J].现代城市轨道交通,2022(8):19-22.
- [12] 刘林旭,吕志鹏,熊雄,等.基于融合终端的配电台区低压柔性直流互联系统[J].供用电,2022,39(4):11-16.
- [13] 贺悝,李勇,曹一家,等.考虑分布式储能参与的直流配电网电压柔性控制策略[J].电工技术学报,2017,32(10):101-110.
- [14] 狄开丽,李鹏,华浩瑞.计及碳排放成本的交直流混合微网优化运行[J].电力建设,2016,37(7):12-19.
- [15] 李经儒,潘峰,杨雨瑶,等.考虑源荷随机性与相关性的直流配电网量测概率优化配置方法[J].电测与仪表,2024,61(7):138-145.
- [16] 宋宜庭.电力电子化交直流混合配电网无功电压分布式优化调控方法[D].吉林:东北电力大学,2024.
- [17] 王薇.PET基柔性太阳能电池薄膜电极的制备及其光电转换性能的研究[D].济南:山东大学,2014.

作者简介:

蒙媛(1978),女,硕士,高级工程师,从事用电信息采集领域的工作;

姚柯祺(1991),男,硕士,工程师,从事配电项目技术工作;

何军(1991),男,硕士,工程师,从事电网计划统计与科技创新管理工作;

崔键祥(1983),男,高级工程师,从事生产建设工作;

辛超(1987),男,硕士,高级工程师,从事配电自动化工作;

方钟升(1990),男,高级工程师,从事安全管理工作。

(收稿日期:2024-07-23)