



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109004691 A

(43)申请公布日 2018. 12. 14

(21)申请号 201810772154.0

(22)申请日 2018.07.13

(71)申请人 天津大学

地址 300072 天津市南开区卫津路92号

申请人 国网江苏省电力有限公司电力科学
研究院

(72)发明人 穆云飞 郭世琦 贾宏杰 余晓丹

黄强 袁晓东 李强 柳丹

(74)专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代

理事务所 12201

代理人 李林娟

(51) Int. Cl.

H02J 5/00(2016.01)

H02J 3/46(2006.01)

H02J 3/32(2006.01)

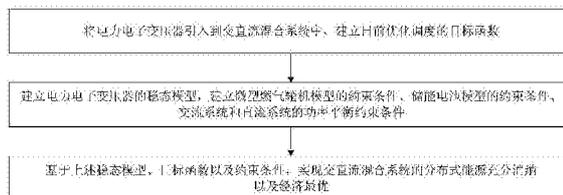
权利要求书2页 说明书12页 附图4页

(54)发明名称

含电力电子变压器的交直流混合系统日前
优化调度方法

(57)摘要

本发明公开了一种含电力电子变压器的交
直流混合系统日前优化调度方法,该方法包括:
将电力电子变压器引入到交直流混合系统中,建
立日前优化调度的目标函数;建立电力电子变压
器的稳态模型,建立微型燃气轮机模型的约束条
件、储能电池模型的约束条件、交流系统和直
流系统的功率平衡约束条件;基于上述稳态模型、
目标函数以及约束条件,实现交直流混合系统的
分布式能源充分消纳以及经济最优。本方法通过
电力电子变压器的功率调节功能来对交流网络
和直流网络之间的功率传递进行控制,可有效实
现分布式发电的充分消纳,另外,通过对分布式
发电的合理应用,降低了电力系统的运行成本,
实现了交直流混合系统的经济运行。



1. 一种含电力电子变压器的交直流混合系统日前优化调度方法,其特征在于,所述方法包括:

将电力电子变压器引入到交直流混合系统中,建立日前优化调度的目标函数;

建立电力电子变压器的稳态模型,建立微型燃气轮机模型的约束条件、储能电池模型的约束条件、交流系统和直流系统的功率平衡约束条件;

基于上述稳态模型、目标函数以及约束条件,实现交直流混合系统的分布式能源充分消纳以及经济最优。

2. 根据权利要求1所述的一种含电力电子变压器的交直流混合系统日前优化调度方法,其特征在于,所述方法将交直流混合系统结构由原来的链式结构变为分布式结构。

3. 根据权利要求1所述的一种含电力电子变压器的交直流混合系统日前优化调度方法,其特征在于,所述日前优化调度的目标函数具体为:

$$\begin{aligned} \text{Min COST} &= f(P_{MT_i}, P_{B_i}, P_{Mo_i}) \\ &= \sum_i [Cost_{MT_i} + Cost_{B_i} + Cost_{Mo_i}] \\ &= \sum_i [(\rho_{MT} \cdot P_{MT_i}) + Cost_{B_i} + (\rho_{Mo} \cdot P_{Mo_i})] \end{aligned}$$

其中, P_{MT_i} 为微型燃气轮机在t时刻的输出功率; P_{B_i} 为t时刻电池内储存的电能, P_{Mo_i} 为从主网流向PET内部的有功功率及无功功率。

4. 根据权利要求1所述的一种含电力电子变压器的交直流混合系统日前优化调度方法,其特征在于,所述电力电子变压器稳态模型具体为:

考虑不允许电能从交直流系统输送到主网情况下,三端口功率满足:

$$P_{ACo_i} + P_{DCo_i} + P_{Mo_i} = k_{PET} (P_{ACi} + P_{DCi})$$

容量约束条件:

$$\sqrt{P_{Mo_i}^2 + Q_{Mo_i}^2} \leq S_m$$

交流端口和直流端口处约束条件:

$$\sqrt{P_{ACo_i}^2 + Q_{ACo_i}^2} \leq S_{acm}$$

$$P_{DCo_i} \leq P_{dcm}$$

5. 根据权利要求1所述的一种含电力电子变压器的交直流混合系统日前优化调度方法,其特征在于,所述交流系统和直流系统的功率平衡约束条件具体为:

$$P_{MT_i} + P_{WP_i} + P_{ACi} = P_{L_{AC,i}} + P_{ACo_i}$$

$$P_{PV_i} + P_{PV-WP_i} + P_{DCi} = P_{B_i} + P_{L_{DC,i}} + P_{DCo_i}$$

其中, P_{WP_i} 为t时刻风机出力, $P_{L_{AC,i}}$ 为t时刻交流负荷的负荷量。

6. 根据权利要求3所述的一种含电力电子变压器的交直流混合系统日前优化调度方法,其特征在于,

$$Cost_{MT_i} = \rho_{MT} \cdot P_{MT_i}$$

其中, $Cost_{MT_t}$ 为微型燃气轮机在时间 t 内的发电成本, ρ_{MT} 为微型燃气轮机在 t 时刻的单位发电成本。

7. 根据权利要求3所述的一种含电力电子变压器的交直流混合系统日前优化调度方法, 其特征在于,

$$Cost_{B_t} = [c_B \cdot k_{SOC_{min}} (1 - SOC^{min})] \cdot P_{B_t}$$

其中, $Cost_{B_t}$ 为 t 时刻的电池成本, c_B 为电池的基本成本系数, $k_{SOC_{min}}$ 是与电池的最小充电状态相关联的标量函数, SOC^{min} 为电池的最小充电状态, P_{B_t} 为 t 时刻电池内储存的电能。

8. 根据权利要求3所述的一种含电力电子变压器的交直流混合系统日前优化调度方法, 其特征在于,

$$Cost_{Mo_t} = \rho_{Mo} \cdot P_{Mo_t}$$

其中, $Cost_{Mo_t}$ 为 t 时刻交直流混合系统在主网购电所花费成本, ρ_{Mo} 为主网在 t 时刻的实时电价, P_{Mo_t} 为 t 时刻交直流电力混合系统从主网所购电量。

含电力电子变压器的交直流混合系统日前优化调度方法

技术领域

[0001] 本发明涉及电力电子变压器领域,尤其涉及一种含电力电子变压器的交直流混合系统日前优化调度方法。

背景技术

[0002] 近年来,随着微电网与分布式发电技术的不断发展,越来越多的清洁能源在电力系统中得到应用。由于我国目前面临严峻的能源和环境问题,所以更多的分布式发电装置接入到电网中,降低对环境造成污染的火力发电在电力生产中的比例已经成为电力行业发展必然的趋势^[1]。

[0003] 分布式能源接入电网分为交流接入和直流接入两种类型。直流接入相比交流接入方式,可以节省换流环节,降低系统损耗,另外,直流接入电网不需要考虑相位与频率的同步,使得系统的可控性和可靠性大大增强。因此,直流是分布式可再生能源最为理想的接入形式。然而,考虑到电力系统的历史原因,在现阶段,微电网的主要形式还是交流系统,想在短期内把微电网全部改为直流接入不太可能,因此,交直流并存的混合电力系统将会是以后很长一段时期仍然占主要比例的系统结构^[2]。

[0004] 对于大规模的分布式发电装置接入电力系统,并不是简单的将其和电力系统相连便可以实现,由于分布式发电装置受太阳能、风能各种条件的约束,其发电具有间歇性,其大量的接入会对电网造成扰动,而以目前电网的柔性调控和互联互通能力,还不足以解决上述问题,因此阻碍了分布式可再生能源的充分消纳与经济利用。

[0005] 为解决上述问题,本文提出将新型的电力电子变压器应用于含分布式再生能源的交直流混合系统中,电力电子变压器是在高频变压器的基础上增加了电力电子变换电路,通过电力电子器件与高频变压器相结合来实现其功能,由于PET(电力电子变压器)同时具有交流接口和直流接口,使得其具有变压、隔离和能量传输功能,可以作为“能量路由器”,实现对其端口处的能量协调管理^[3]。

[0006] 对于电力电子变压器的研究,目前主要集中在其拓扑结构、物理模型以及控制策略上,将其应用到电力系统中的研究也大多只涉及配电网。文献[4]中对电力电子变压器的工作原理、拓扑结构以及控制策略进行了详尽地阐述,并对电力电子变压器与现有电网的结合进行了构想与展望;文献[5]提出了将电力电子变压器应用于配电网时的拓扑结构和控制策略,并利用电力系统电磁暂态仿真软件(例如:可以为PSCAD软件)对含电力电子变压器的配电网进行了仿真分析;文献[6]基于谐振变换器的工作特点,提出了面向中高压电网的电力电子变压器统一降阶建模方法及单级控制策略。该模型和策略相比于传统电力电子变压器的建模方法与控制策略结构更简单,控制能力更强。

[0007] 对于交直流混合系统的分布式能源日前优化调度,文献[7]中提出了一种基于本地信息的能量管理和协调控制方法,来实现多源、多负荷交直流微电网的能量管理和协调控制;文献[8]将经济成本与环境成本相结合,以此作为目标函数,在此基础上建立了交直流混合系统优化运行模型,并提出了基于改进黑洞算法来对交直流混合系统进行优化运

算;文献[9]对于交直流混合系统能量管理提出了一种概率经济调度方法,采用蒙特卡洛以及场景缩减技术对不可控负载以及分布式能源进行负荷预测,并通过不同状况下算例的对比验证了所提方法的有效性和可行性。

[0008] 上述文献分别对电力电子变压器和交直流混合系统的分布式能源日前优化调度进行了有益的探索和分析,但是并没有把电力电子变压器和交直流混合系统的分布式能源日前优化调度进行结合,未能充分发挥电力电子变压器灵活协调的“能量路由器”作用。

发明内容

[0009] 本发明提供了一种含电力电子变压器的交直流混合系统日前优化调度方法,本发明建立了系统级优化运行的模型,以改善目前电力系统中存在的交直流变换环节复杂,电网应对不确定因素能力差的缺陷,详见下文描述:

[0010] 一种含电力电子变压器的交直流混合系统日前优化调度方法,所述方法包括:

[0011] 将电力电子变压器引入到交直流混合系统中,建立日前优化调度的目标函数;

[0012] 建立电力电子变压器的稳态模型,建立微型燃气轮机模型的约束条件、储能电池模型的约束条件、交流系统和直流系统的功率平衡约束条件;

[0013] 基于上述稳态模型、目标函数以及约束条件,实现交直流混合系统的分布式能源充分消纳以及经济最优。

[0014] 进一步地,所述方法将交直流混合系统结构由原来的链式结构变为分布式结构。

[0015] 优选地,所述日前优化调度的目标函数具体为:

$$\text{Min } \text{COST} = f(P_{MT_i}, P_{B_i}, P_{Mo_i})$$

$$[0016] \quad = \sum_t [\text{Cost}_{MT_i} + \text{Cost}_{B_i} + \text{Cost}_{Mo_i}]$$

$$= \sum_t [(\rho_{MT_i} \cdot P_{MT_i}) + \text{Cost}_{B_i} + (\rho_{Mo_i} \cdot P_{Mo_i})]$$

[0017] 其中, P_{MT_i} 为微型燃气轮机在t时刻的输出功率; P_{B_i} 为t时刻电池内储存的电能, P_{Mo_i} 为从主网流向PET内部的有功功率及无功功率。

[0018] 进一步地,所述电力电子变压器稳态模型具体为:

[0019] 考虑不允许电能从交直流系统输送到主网情况下,三端口功率满足:

$$[0020] \quad P_{ACo_i} + P_{DCo_i} + P_{Mo_i} = k_{PET} (P_{ACi_i} + P_{DCi_i})$$

[0021] 容量约束条件:

$$[0022] \quad \sqrt{P_{Mo_i}^2 + Q_{Mo_i}^2} \leq S_m$$

[0023] 交流端口和直流端口处约束条件:

$$[0024] \quad \sqrt{P_{ACo_i}^2 + Q_{ACo_i}^2} \leq S_{acm}$$

$$[0025] \quad P_{DCo_i} \leq P_{dcm}$$

[0026] 其中,所述交流系统和直流系统的功率平衡约束条件具体为:

$$[0027] \quad P_{MT_i} + P_{WP_i} + P_{ACi_i} = P_{LACi_i} + P_{ACo_i}$$

$$[0028] \quad P_{PV_i} + P_{PV-WP_i} + P_{DCi_i} = P_{B_i} + P_{LDCi_i} + P_{DCo_i}$$

[0029] 其中, P_{WP_t} 为t时刻风机出力, $P_{L_{AC,t}}$ 为t时刻交流负荷的负荷量。

[0030] 优选地,

$$[0031] \quad Cost_{MT_t} = \rho_{MT} \cdot P_{MT_t}$$

[0032] 其中, $Cost_{MT_t}$ 为微型燃气轮机在时间t内的发电成本, ρ_{MT} 为微型燃气轮机在t时刻的单位发电成本。

[0033] 优选地,

$$[0034] \quad Cost_{B_t} = [c_B \cdot k_{SOC_{min}} (1 - SOC^{min})] \cdot P_{B_t}$$

[0035] 其中, $Cost_{B_t}$ 为t时刻的电池成本, c_B 为电池的基本成本系数, $k_{SOC_{min}}$ 是与电池的最小充电状态相关联的标量函数, SOC^{min} 为电池的最小充电状态, P_{B_t} 为t时刻电池内储存的电能。

[0036] 优选地,

$$[0037] \quad Cost_{Mo_t} = \rho_{Mo} \cdot P_{Mo_t}$$

[0038] 其中, $Cost_{Mo_t}$ 为t时刻交直流混合系统在主网购电所花费成本, ρ_{Mo} 为主网在t时刻的实时电价, P_{Mo_t} 为t时刻交直流电力混合系统从主网所购电量。

[0039] 本发明提供的技术方案的有益效果是:

[0040] 1、本发明从电力电子变压器的基本运行特征与不同运行模式下的可调控能力出发,为实现多种可再生能源的灵活、高效消纳,考虑新型电力电子设备与交直流混合系统运行特性,提出含电力电子变压器交直流混合系统的分布式能源日前优化调度方法;

[0041] 2、本发明在深入了解电力电子变压器的运行特征及交直流混合可再生能源电力系统的应用场景的基础上,对电力电子变压器的运行模式进行了研究;

[0042] 3、本发明在熟练掌握Matlab平台下的程序开发技术的基础上,考虑交直流网络柔性调控能力,研究以经济最优为目标的日前优化调度策略;

[0043] 4、本发明中的电力电子变压器通过其端口处功率的调控能力,可以使得功率在主网、交流电力系统、直流电力系统中灵活传输,从而提高新能源的消纳能力,降低电力系统的运行成本,提高电力系统的经济性。

附图说明

[0044] 图1为含电力电子变压器的交直流混合系统分布式能源的日前优化调度方法的流程图;

[0045] 图2为含PET交直流混合系统的结构图;

[0046] 图3为电力电子变压器工作原理的示意图;

[0047] 图4为PET三端口等效模型的示意图;

[0048] 图5为含PET的交直流混合系统的结构图;

[0049] 图6为PET交直流端口输出功率的示意图;

[0050] 图7为主网功率注入和电池充放电安排的示意图;

[0051] 图8为光伏发电与电池充放电安排的示意图。

具体实施方式

[0052] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面对本发明实施方式作进一步地详细描述。

[0053] 为了更好地方便理解,下面对本发明实施例提供的含电力电子变压器的交直流混合系统分布式能源的日前优化调度方法的设计原理介绍如下:

[0054] 本发明实施例所设计的含电力电子变压器的交直流混合系统日前优化调度方法并不是电力电子变压器和原有含交直流混合系统的简单相加,说明如下:

[0055] 一方面,交流电力系统和直流电力系统之间的连接部分为系统中的核心部分,将电力电子变压器引入到混合电力系统中,需要对作为实物的电力电子变压器进行数学建模,以使其可以用于优化;

[0056] 另一方面,电力电子变压器的引入改变了交直流混合系统的拓扑结构,电力系统由原来的链式结构变为分布式结构,即:传统交直流混合系统中主网通过变压器与交流系统相连,交流系统通过交直流变换器与直流系统相连,为链式结构;通过引入具有功率调控能力以及变压能力的电力电子变压器,可将主网,交流系统,直流系统直接连接到电力电子变压器三个端口,使系统结构变为更加灵活稳定的分布式结构。

[0057] 在建立电力电子变压器的数学模型的基础上,本发明实施例给出了系统中各部分的约束条件以及系统总体的优化目标函数,并通过Matlab程序对日前优化调度问题进行了求解,从而得到含电力电子变压器的交直流混合系统的分布式能源日前优化调度结果。

[0058] 实施例1

[0059] 一种含电力电子变压器的交直流混合系统分布式能源的日前优化调度方法,参见图1,该方法包括以下步骤:

[0060] 101:将电力电子变压器引入到交直流混合系统中,建立日前优化调度的目标函数;

[0061] 102:建立电力电子变压器的稳态模型,建立微型燃气轮机模型的约束条件、储能电池模型的约束条件、交流系统和直流系统的功率平衡约束条件;

[0062] 103:基于上述稳态模型、目标函数以及约束条件,实现交直流混合系统的分布式能源充分消纳以及经济最优。

[0063] 综上所述,本发明实施例将电力电子变压器应用于交直流混合系统的分布式能源日前优化调度中,建立了系统级优化运行的模型,以改善目前电力系统中存在的交直流变换环节复杂,电网应对不确定因素能力差的缺陷。本方法利用电力电子变压器的功率调节功能,来对交流网络和直流网络之间的功率传递进行控制,实现分布式发电的充分消纳,另外,通过对分布式发电的合理应用,降低电力系统的运行成本,实现交直流混合系统运行的经济化。

[0064] 实施例2

[0065] 下面结合图2-图4对实施例1中的方案进行进一步地介绍,详见下文描述:

[0066] 一、含PET交直流混合系统(即网络)

[0067] 基于电力电子变压器的典型交直流混合系统拓扑结构图如图2所示,在此结构下,主网与PET的一个端口直接相连,并通过PET的另外两个端口与直流网络和交流网络相连

接。

[0068] 直流网络中的分布式可再生能源主要是通过DC-DC变换器并网,交流网络中的分布式可再生能源主要通过DC-AC、AC-DC-AC等变换器来并网。分布式可再生能源根据其自身的特性、运行成本和运行效率等各种影响因素来选择接入方式。光伏发电(即图2直流网络中的光伏电池)、电动汽车(即图2直流网络中的充电桩)等可再生能源在本系统中采用直流接入方式,风力发电(即图2直流网络中的风机)采用交流接入方式,储能电池(即图2直流网络中的蓄电池)由于其不受地理条件的限制,在本系统中通过直流接入^[10]。

[0069] 含PET的交直流混合系统由于电力电子变压器的功率调节能力使其可以在系统中充当“能量路由器”的作用^[11],例如:当交流电力系统中发电有盈余,而此时直流电力系统中发电不足以满足负荷的需求,此时电能便通过电力电子变压器从交流电力系统输送至直流电力系统,一方面这使得交直流电力系统各自实现了供需平衡,使得其不需要从主网输送电能来进行调节,增强了电网的稳定性;另一方面,使得电力系统中分布式可再生能源的出力得以充分消纳,提高了DER(分布式能源)的使用比例,防止了“弃风弃光”现象的发生。同理,当直流电力系统中发电有盈余,交流电力系统中发电量不足的情况下,电力电子变压器可以将能量从直流侧输送到交流侧;当直流电力系统和交流电力系统同时有盈余时,可以通过电力电子变压器将交直流混合系统中的盈余电能输送至主网;当交直流电力系统负荷过大,发电量不能满足自给自足时,为实现供需平衡,维护系统的稳定,通过电力电子变压器将从主网所购得的电能注入到交流电力系统和直流电力系统中^[12]。

[0070] 二、PET稳态模型

[0071] 电力电子变压器,又称作电子电力变压器(Electronic Power Transformer, EPT),固态变压器(Solid State Transformer, SST)和柔性变压器(Flexible Transformer, FT),是一种将电力电子电路与传统的高频变压器相结合,通过电力电子技术来实现能量传递和电力变换的新型变压器^[13-18]。其工作原理如图3所示,根据电力电子变压器在变换过程中是否存在中间直流环节,可以将PET分为直接AC/AC型PET和AC/DC/AC型PET,常用的是后者。

[0072] 对于电力电子变压器的约束问题,本发明实施例不考虑其具体的内部模型,而是将其等效为一个带损耗的三端口电力电子器件,其拓扑结构如图4(其中,图4中仅给出了有功功率,无功功率未示出)所示。电力电子变压器在t时刻的可控制变量包括:从主网流向PET内部的有功功率及无功功率 P_{M_t} 和 Q_{M_t} 、从交流电力系统流向PET内部的有功功率及无功功率 P_{AC_t} 和 Q_{AC_t} 、从直流电力系统流向PET内部的有功功率 P_{DC_t} 、从PET内部流向交流电力系统的有功功率及无功功率 P_{AC_t} 和 Q_{AC_t} 以及从PET内部流向直流电力系统的有功功率 P_{DC_t} 。 S_m 为电力电子变压器主网侧最大接入容量, S_{acm} 为交流侧最大接入容量, P_{dcm} 为直流侧最大接入有功功率^[19]。

[0073] 电力电子变压器作为能量传输的中间枢纽,其内部存在一定的功率损耗,在此处本方法定义常量 k_{PET} 为电力电子变压器的功率损耗系数。在此基础上,可以将PET简化为一个节点,注入此节点的有功功率与功率损耗系数的乘积等于从此节点输出的有功功率,考虑尽可能实现分布式能源的就地充分消纳,所以令 P_{M_t} (参见图4)恒为0,即不允许将电能从交直流系统输送到主网,因此即有以下公式成立:

$$[0074] \quad P_{ACo_t} + P_{DCo_t} + P_{Mo_t} = k_{PET} (P_{ACi_t} + P_{DCi_t}) \quad (1)$$

[0075] 由于电力电子变压器的容量存在限制,所以有以下约束成立:

$$[0076] \quad \sqrt{P_{Mo_t}^2 + Q_{Mo_t}^2} \leq S_m \quad (2)$$

[0077] 同理,电力电子变压器交流端口和直流端口处分别有以下约束成立:

$$[0078] \quad \sqrt{P_{ACo_t}^2 + Q_{ACo_t}^2} \leq S_{acm} \quad (3)$$

$$[0079] \quad P_{DCo_t} \leq P_{dcn} \quad (4)$$

[0080] 三、微型燃气轮机模型

[0081] 微型燃气轮机在优化过程中作为控制变量,其发电量的约束如下:

$$[0082] \quad 0 \leq P_{MT_t} \leq P_{MT}^{\max} \quad (5)$$

$$[0083] \quad P_{MT_{t+1}} - P_{MT_t} \leq RU_{MT} \quad (6)$$

$$[0084] \quad P_{MT_t} - P_{MT_{t+1}} \leq RD_{MT} \quad (7)$$

[0085] 式(5)对微型燃气轮机的发电功率进行了限制,而式(6)和(7)则对微型燃气轮机的斜坡下降和上升速率进行了控制,其上升和下降速率取决于微型燃气轮机的电气特性,其中 P_{MT_t} 为微型燃气轮机在t时刻的输出功率, $P_{MT_{t+1}}$ 为微型燃气轮机在t+1时刻的输出功率, P_{MT}^{\max} 为微型燃气轮机的输出功率上限值, RU_{MT} 为微型燃气轮机的输出功率上升速率上限, RD_{MT} 为微型燃气轮机的输出功率下降速率上限。

[0086] 四、储能电池模型

[0087] 储能电池作为系统中可以对能量进行存储的设备,其可以平衡负荷峰值与发电峰值之间的不同步现象,其操作受存储容量和充电、放电速率的限制,运行约束如下所示:

$$[0088] \quad 0 \leq P_{Bch_t} \leq X_{ch_t} \cdot P_{Bch}^{\max} \quad (8)$$

$$[0089] \quad 0 \leq P_{Bdch_t} \leq X_{dch_t} \cdot P_{Bdch}^{\max} \quad (9)$$

$$[0090] \quad X_{ch_t} + X_{dch_t} \leq 1 \quad (10)$$

$$[0091] \quad P_{B_t} \leq B_{cap} \quad (11)$$

[0092] 约束式(8)和(9)限制电池的充电和放电容量,其中 P_{Bch_t} 为t时刻电池的充电量, P_{Bch}^{\max} 为每小时电池的充电量上限, P_{Bdch_t} 为t时刻电池的放电量, P_{Bdch}^{\max} 为每小时电池的放电量上限, X_{ch_t} 和 X_{dch_t} 是在式(10)中考虑电池充放电循环而定义的“0/1”二进制变量。约束式(11)对电池储电容量进行了限制,其中 P_{B_t} 为t时刻电池内储存的电能量, B_{cap} 为电池的储存电能量的上限值。

[0093] t+1时刻和t时刻电池内储存的电能量有如下关系:

$$[0094] \quad P_{B_{t+1}} = P_{B_t} + P_{Bch_t} - P_{Bdch_t} \quad (12)$$

[0095] 具体实现时,公式(8)-(12)与能量储存的电特性严格相关,并且不取决于交直流混合系统的网络结构。

[0096] 五、含PET的交直流混合系统优化模型

[0097] 交直流混合系统24小时的优化问题可以在数学上表示为一个混合整数非线性优化(MINLP)问题^[20],其优化目标是实现整个含电力电子变压器的交直流电力系统总运行费用的最小化,本发明实施例中的电力系统网络包括交流网络,直流网络以及将它们相连接的电力电子变压器^[21]。

[0098] 六、优化问题的目标函数

[0099] 本优化问题的目标是使得交直流混合系统的运行费用最小化,而运行费用具体又包括发电机的发电费用、从主网购电的费用以及电池充放电成本。其用数学表达式表达如式(13)所示:

$$\text{Min } \text{COST} = f(P_{MT_i}, P_{B_i}, P_{Mo_i})$$

$$= \sum_t [\text{Cost}_{MT_i} + \text{Cost}_{B_i} + \text{Cost}_{Mo_i}] \quad (13)$$

$$= \sum_t [(\rho_{MT} \cdot P_{MT_i}) + \text{Cost}_{B_i} + (\rho_{Mo} \cdot P_{Mo_i})]$$

[0101] 其中:

[0102] (a) $\text{Cost}_{MT_i} = \rho_{MT} \cdot P_{MT_i}$;微型燃气轮机在时间t内的发电成本,其中 P_{MT_i} 为微型燃气轮机在t时刻的输出功率, ρ_{MT} 为微型燃气轮机在t时刻的单位发电成本;

[0103] (b) Cost_{B_i} :t时刻的电池成本, $\text{Cost}_{B_i} = [c_B \cdot k_{SOC_{min}} (1 - SOC^{min})] \cdot P_{B_i}$,其中, c_B 为电池的基本成本系数, $k_{SOC_{min}}$ 是与电池的最小充电状态相关联的标量函数,可以根据制造信息得出, SOC^{min} 为电池的最小充电状态, P_{B_i} 为t时刻电池内储存的电能;

[0104] (c) $\text{Cost}_{Mo_i} = \rho_{Mo} \cdot P_{Mo_i}$:t时刻交直流混合系统在主网购电所花费成本,其中 ρ_{Mo} 为主网在t时刻的实时电价, P_{Mo_i} 为t时刻交直流电力混合系统从主网所购电量。

[0105] 七、优化问题的约束条件

[0106] 对于电力电子变压器、微型燃气轮机、储能电池的约束,在上面式(1)-(12)中已经提及。另外,系统还应满足交流系统和直流系统的功率平衡约束,即:

$$P_{MT_i} + P_{WP_i} + P_{ACi} = P_{LACi} + P_{ACo_i} \quad (14)$$

$$P_{PV_i} + P_{PV-WT_i} + P_{DCi} = P_{B_i} + P_{LDCi} + P_{DCo_i} \quad (15)$$

[0109] 式(14)为交流电力系统的功率平衡约束,其中 P_{WP_i} 为t时刻风机出力, P_{LACi} 为t时刻交流负荷的负荷量;

[0110] 式(15)为直流电力系统的功率平衡约束,其中 P_{PV_i} 为t时刻光伏电池的发电量, P_{PV-WT_i} 为t时刻光伏风力发电系统的发电量, P_{LDCi} 为t时刻直流负荷的负荷量。

[0111] 综上所述,本发明实施例从电力电子变压器的基本运行特征与不同运行模式下的可调控能力出发,为实现多种可再生能源的灵活、高效消纳,考虑新型电力电子设备与交直流混合系统运行特性,提出含电力电子变压器交直流混合系统的分布式能源日前优化调度方法。

[0112] 实施例3

[0113] 下面结合图5-图8对实施例1和2中的方案进行可行性验证,详见下文描述:

[0114] 含电力电子变压器的交直流混合系统结构如图5所示,系统由交流网络和直流网络组成,交流网络电压等级为380V,直流网络电压等级为400V,其中间依靠电力电子变压器进行能量的传输,电力电子变压器的三个端口除与交流电力系统和直流电力系统连接外,还有一个端口与主网直接相连,当交直流电力系统中能量供应不足或者从主网购电经济性更好的时候,电力系统会从主网端口处购电并通过电力电子变压器注入交直流电力系统中,以保证能量的供需平衡。

[0115] 交流电力系统中包含微型燃气轮机 (Micro gas turbine, MT)、风机 (Wind power plant, WP)、交流负荷 (AC Load),微型燃气轮机容量 $P_{MT}^{\max}=300\text{kW}$,交流负荷24小时数据见表1,风机24小时发电量见附录表2。

[0116] 其中,每个时刻微型燃气轮机的发电量为控制变量,风机出力以及交流负荷的负荷量为给定值。交流网络可以通过自身微型燃气轮机的供能以及风机出力来满足负荷的需求,此外,由于电力电子变压器的接入,使得此网络获取能量的途径更加广泛。一方面,当交流网络电能盈余,直流网络电能不足或者交流网络电能不足,直流网络电能盈余时,可以通过从其中一个网络向另外一个网络输送电能来平衡供需的差值,另一方面,当交流网络和直流网络同时处于电能不足的状态时,可以通过电力电子变压器在主网处获取电能。

[0117] 直流电力系统包括:光伏发电单元 (Photovoltaic power generation, PV)、电池储能装置 (Battery storage, BES)、光伏风力发电装置 (PV-WP)、直流负荷 (DC load),直流负荷24小时数据见表1,光伏发电单元及光伏风力发电装置24小时发电量见表2,电池储能装置储存电能的上限值 $B_{\text{cap}}=200\text{kW}$,每小时电池充放电上限 $P_{\text{Bch}}^{\max}=P_{\text{Bdch}}^{\max}=40\text{kW}$ 。其中,每个时刻电池储能装置储能量、光伏发电量为控制变量。

[0118] 在本方法中,对于光伏风力发电装置的具体原理不进行研究,其在24小时内的具体发电量假设为给定值,同样直流负荷的负荷量为给定值。对于电池的状态,由优化的解来决定其在每小时内是充电还是放电。电池在充电时可以视为负荷,当其放电时,可以视为发电装置。

[0119] 电力电子变压器的可控制变量包括主网侧有功无功输出 P_{Mo_i} 和 Q_{Mo_i} 以及交流电力系统和直流电力系统侧的有功注入 P_{ACo_i} 和 P_{DCo_i} ,在本算例中,为保证交直流混合系统能尽可能实现自给自足,同时也兼顾交直流混合系统的安全性和稳定性,对于主网的注入功率 P_{Mo_i} 最大值限定为60kW,对于交流电力系统和直流电力系统侧的有功注入 P_{ACo_i} 和 P_{DCo_i} ,本发明实施例设定其最大功率为150kW,即 $P_{\max}=150\text{kW}$,日前优化调度的具体结果在表3中列出。

[0120] 图6中给出了24小时内PET直流端口和交流端口的输出功率图,值为正则表示功率从交流/直流电力系统流出,值为负则表示功率注入交流/直流电力系统,从图6中可以看出,在1-8h内由于光伏发电量很少,直流电力系统中有功率供不应求,功率从交流电力系统流入直流电力系统,在9-16h内,由于光伏发电装置开始工作,直流电力系统开始有能量盈余,能量又开始从直流电力系统注入交流电力系统,17-24h内由于光伏发电量再次为0,功率再次由交流电力系统流入直流电力系统。在此情况下,电力系统24h内的总花费为2356.7元。

[0121] 图7显示了电池的充放电优化结果以及主网处功率注入的结果,图8显示了光伏发

电与电池充放电的关系。当主网的电能价格比交直流电力系统自发电更便宜时,系统会从主网购入电能。可以看出在3-6h、19-22h中存在主网购电行为,通过图7、图8可以发现,电池充电过程在有主网功率注入和光伏电池发电的时刻发生。

[0122] 在1-6h内电池进行充电,在这个时间段内电力系统有从主网进行购电,这也证明了优化的全局性,在主网价格低的时刻买电储存在电池中,在主网价格高、系统负荷大的时刻放电,在9-16h内,由于光伏电池处于电能生产的峰值,直流侧功率有盈余,所以电池进行充电,在16h之后,当直流侧功率供不应求时,电池进行放电来释放电能,通过电池在不同时段的充放电,实现了电力系统的供需平衡以及经济性,而且有效提高了电力系统的安全性。

[0123] 结果表明:将电力电子变压器应用于交直流混合系统中,通过电力电子变压器的功率调节功能来对交流网络和直流网络之间的功率传递进行控制,可有效实现分布式发电的充分消纳,另外,通过对分布式发电的合理应用,降低了电力系统的运行成本,实现了交直流混合系统的经济运行。

[0124] 表1交直流负荷数据

时间(h)	交流负荷(kW)	直流负荷(kW)
1	251.5	217.158
2	264.55	222.989
3	274.26	223.92
4	288.21	229.639
5	295.23	232.817
6	306.46	234.287
7	326.11	247.167
8	329.58	239.761
9	354.3	244.22
10	344.84	245.508
11	346.19	246.614
12	346.23	244.948
13	352.72	252.487
14	342.66	251.094
15	345.91	246.572
16	350.57	247.797
17	338.42	245.382
18	321.99	250.135
19	324.87	234.448
20	295.66	235.064
21	297.66	232.6
22	275.73	226.748
23	269.22	229.611
24	244.81	223.948

[0127] 表2分布式发电装置发电量数据

时间(h)	风机发电量 (kW)	风电光伏发电量 (kW)	光伏发电量(kW)
1	112.592	97.1104	0
2	119.272	105.1264	0
3	115.496	100.5952	0
4	116.336	101.6032	0
5	113.208	97.8496	0
6	118.16	103.792	23.75
7	119.368	105.2416	71.25
[0128] 8	120.456	106.5472	118.75
9	119.504	149.5	166.25
10	122.2	192.25	201.875
11	115.136	220.75	225.625
12	118.424	232.15	235.125
13	120.8	232.15	235.125
14	121.672	220.75	225.625
15	114.768	192.25	201.875
16	115.656	149.5	166.25
17	114.432	99.3184	118.75
18	120.344	106.4128	23.75
19	119.24	105.088	0
20	122.184	108.6208	0
[0129] 21	120.312	106.3744	0
22	114.992	99.9904	0
23	120.624	106.7488	0
24	123.184	109.8208	0

[0130] 表3含PET交直流混合系统日前调度结果

时间(h)	微型燃气轮机(kW)	电池(kW)	主网购电量(kW)
1	262.0571	3.1015	0
2	263.7308	0.5902	0
3	242.1395	20.0507	60
4	251.91	12.0002	60
5	260.0515	3.0621	60
6	248.802	13.757	60
7	267.6702	-9.7472	0
8	212.8219	-10.7659	0
9	170.1384	6.8724	0
10	100.4589	26.4359	0
11	57.115	25.822	0
12	30.7707	25.2917	0
13	42.6546	25.5226	0
14	51.3885	25.6815	0
15	110.6827	27.0937	0
16	172.4503	5.4893	0
17	214.5458	-36.7558	0
18	292.9829	-28.6353	0
19	253.4822	-21.5078	60
20	218.0672	-21.852	60
21	221.8461	-21.7275	60
22	205.6422	-21.8534	60
23	252.8103	-18.6479	0
24	206.4751	-29.2781	0

[0131] [0132] 参考文献

[0133] [1] 韩尚卿. 交直流混合微电网运行控制关键技术研究[D]. 北京交通大学, 2016.

[0134] [2] 马剑. 交直流混合系统多元互补优化运行研究[D]. 华北电力大学, 2016.

[0135] [3] 兰征, 涂春鸣, 肖凡等. 电力电子变压器对交直流混合系统功率控制的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 50-57.

[0136] [4] 陈磊, 欧家祥, 张秋雁, 袁旭峰, 胡晟, 游菲, 石果. 电力电子变压器研究综述[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(12): 36-42.

[0137] [5] 廖国虎, 袁旭峰, 邱国跃. 配电网电力电子变压器仿真研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51(17): 35-41.

[0138] [6] 刘海军, 李刚, 王志凯, 赵国亮, 田鑫, 刘闯. 面向中高压智能配电网的电力电子变压器建模方法与控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(02): 85-93.

[0139] [7] 张学, 裴玮, 邓卫, 屈慧, 沈子奇, 赵振兴. 多源/多负荷直流微电网的能量管理和协调控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, (31): 5553-5562.

[0140] [8] 狄开丽, 李鑫明, 李鹏, 徐绍军, 孙健. 基于改进黑洞算法的交直流混合系统优化运行[J]. 电力建设, 2016, (10): 1-8.

- [0141] [9] Battistelli C, Agalgaonkar Y P, Pal B C. Probabilistic Dispatch of Remote Hybrid Microgrids Including Battery Storage and Load Management[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, PP (99): 1-1.
- [0142] [10] Liu Y, Zhang D H, Sun D D. Performance Analysis of a Solid State Transformer for Smart Grid[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 441: 174-177.
- [0143] [11] 赵争鸣, 冯高辉, 袁立强, 张春朋. 电能路由器的发展及其关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (13): 3823-3834.
- [0144] [12] Tian L, Tang Z, Jiao T, et al. Economic indicators research of microgrid based on multi-objective evaluation method[J]. Power System Protection & Control, 2016.
- [0145] [13] 陈磊, 欧家祥, 张秋雁, 袁旭峰, 胡晟, 游菲, 石果. 电力电子变压器研究综述[J]. 电网与清洁能源, 2015, (12): 36-42.
- [0146] [14] 刘闯, 支月媚. 混合级联式电力电子变压器拓扑结构及控制策略[J]. 电网技术, 2017, 41 (02): 596-603.
- [0147] [15] Zhao C, Dong S, Gu C, et al. New Problem Formulation for Optimal Demand Side Response in Hybrid AC/DC Systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, PP (99): 1-1.
- [0148] [16] Jakka V N S R, Shukla A. Integration of AC and DC sources using multi-source fed power electronic transformer (MSF-PET) for modern power distribution system applications[C]//European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2016.
- [0149] [17] Yan J, Zhu X, Lu N. Smart hybrid house test systems in a solid-state transformer supplied microgrid[J]. 2015: 1-5.
- [0150] [18] Majumder R. A Hybrid Microgrid With DC Connection at Back to Back Converters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5 (1): 251-259.
- [0151] [19] 张祥龙, 周晖, 肖智宏, 张伟, 伍迪. 电力电子变压器在有源配电网无功优化中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45 (04): 80-85.
- [0152] [20] 李鹏, 华浩瑞, 陈安伟, 狄开丽. 基于二层规划模型的交直流混合系统源荷储协调分区优化经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36 (24): 6769-6779+6931.
- [0153] [21] Jayawardena A V, Meegahapola L G, Perera S, et al. Dynamic characteristics of a hybrid microgrid with inverter and non-inverter interfaced renewable energy sources: A case study[C]//IEEE International Conference on Power System Technology. IEEE, 2012: 1-6.
- [0154] 本发明实施例对各器件的型号除做特殊说明的以外, 其他器件的型号不做限制, 只要能完成上述功能的器件均可。
- [0155] 本领域技术人员可以理解附图只是一个优选实施例的示意图, 上述本发明实施例序号仅仅为了描述, 不代表实施例的优劣。
- [0156] 以上所述仅为本发明的较佳实施例, 并不用以限制本发明, 凡在本发明的精神和原则之内, 所作的任何修改、等同替换、改进等, 均应包含在本发明的保护范围之内。

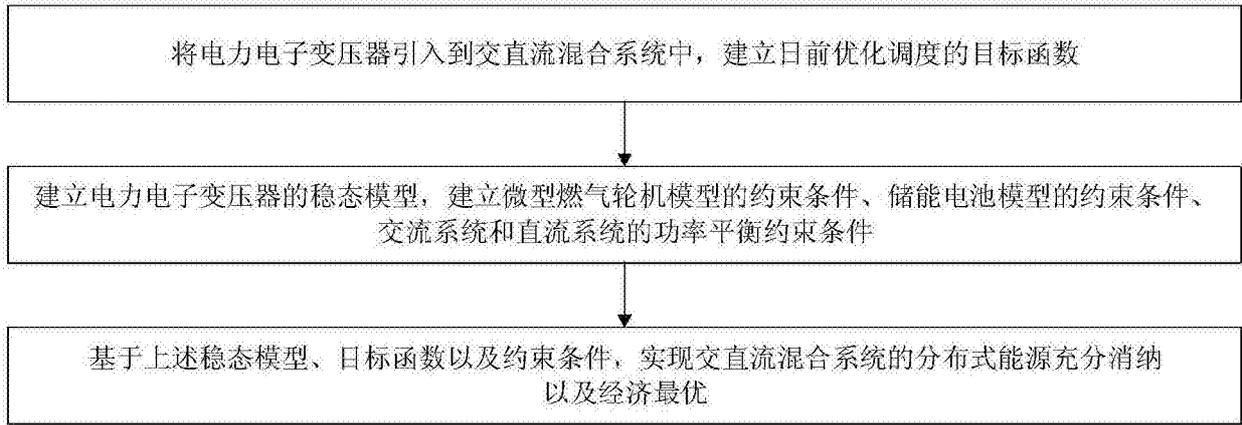


图1

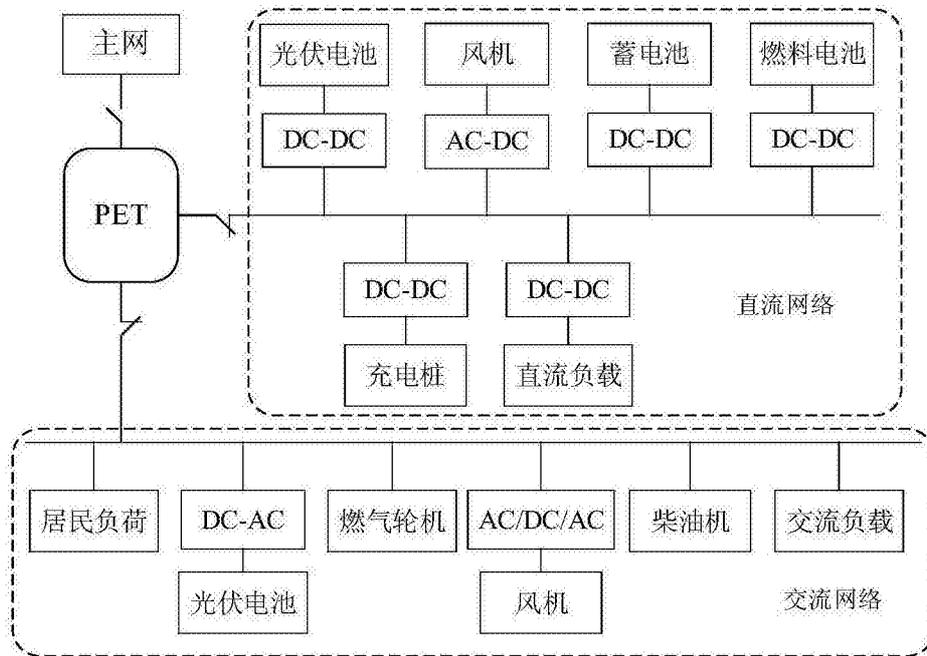


图2

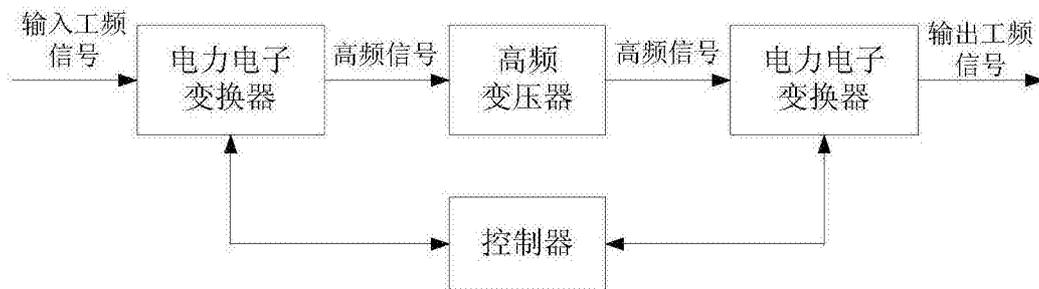


图3

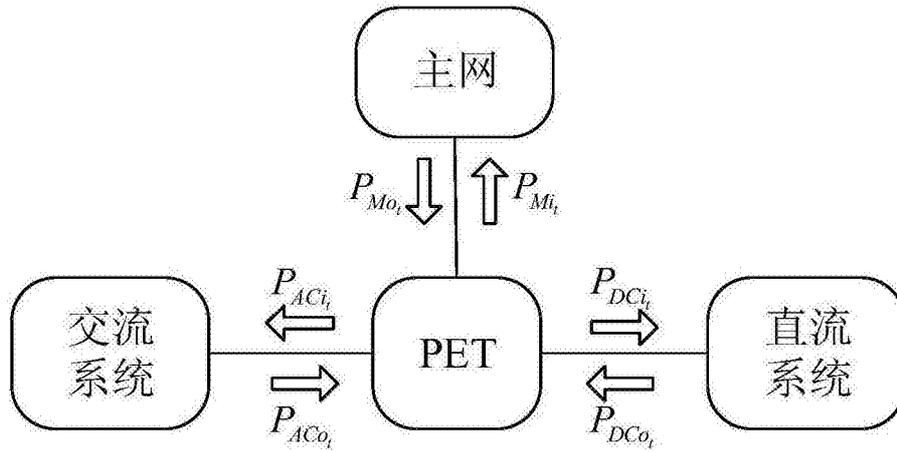


图4

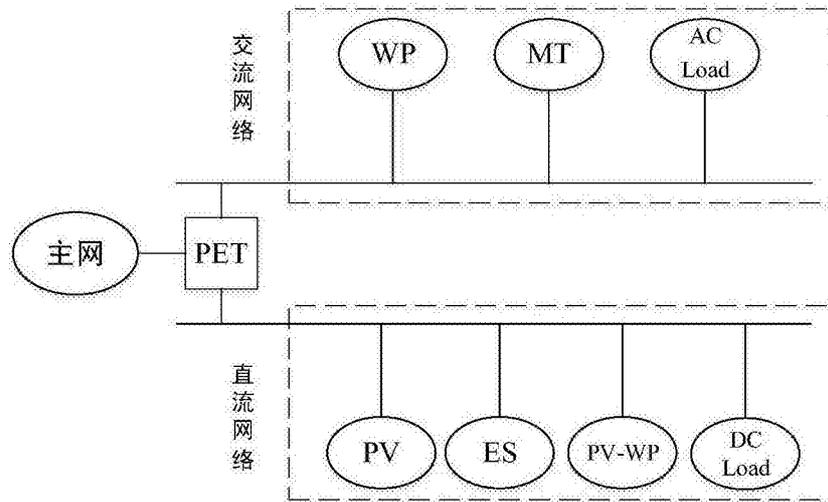


图5

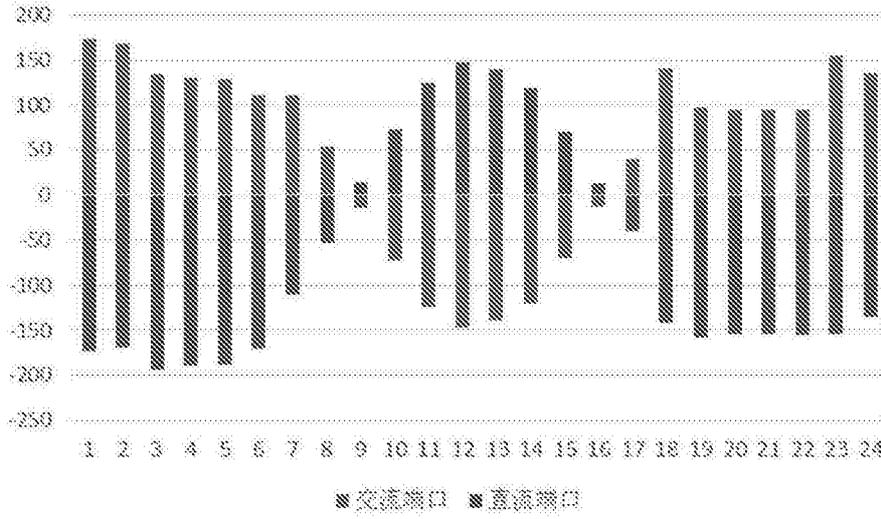


图6

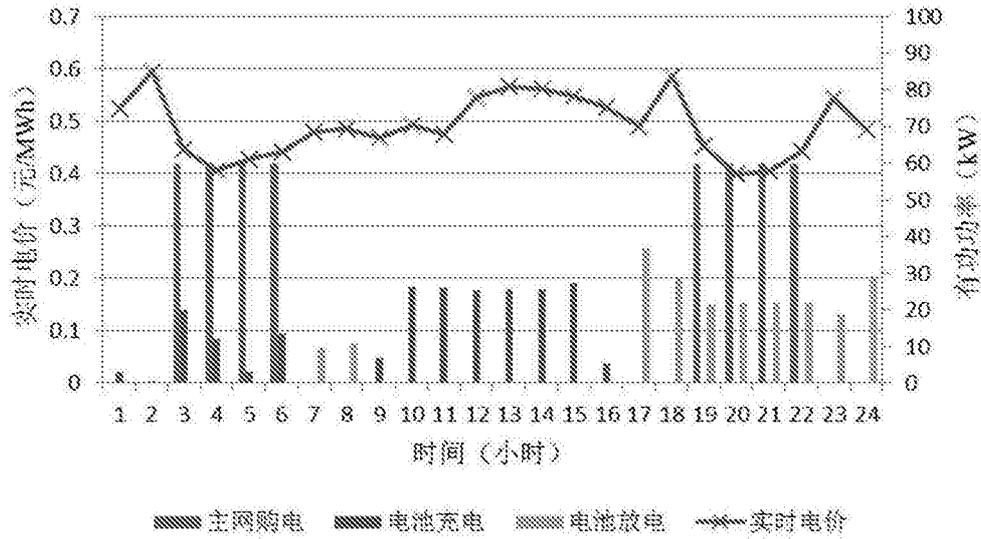


图7

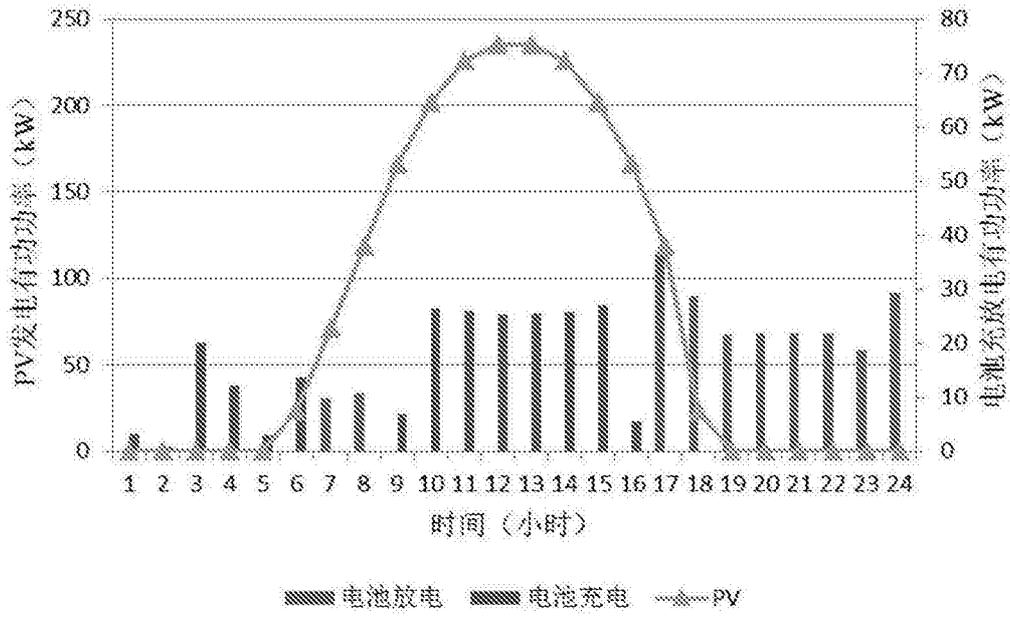


图8