

含电力电子变压器的交直流混合分布式 能源系统日前优化调度

郭世琦¹, 穆云飞¹, 陈乃仕², 蒲天骄², 袁晓冬³, 李 强³

- (1. 智能电网教育部重点实验室, 天津大学, 天津 300072;
2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;
3. 江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:提出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。首先,建立了电力电子变压器的稳态模型;然后对于含电力电子变压器的交直流混合系统,建立了其日前优化调度的模型,以实现交直流混合系统分布式能源的充分消纳以及经济最优;最后,用算例来对上述含电力电子变压器交直流系统模型进行验证,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,降低了系统的运行成本,实现了交直流混合系统的经济运行。

关键词:电力电子变压器;交直流混合系统;分布式能源;电力系统优化调度

DOI: 10.12067/ATEEE1806018 **文章编号:** 1003-3076(2019)02-0044-08 **中图分类号:** TM732

1 引言

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电网,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的必然趋势^[1]。

分布式能源(Distributed Energy Resources, DER)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]。

对于大规模的分布式发电装置接入系统,并不是简单的将其和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,其大量的分布式发电装置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。

为解决上述问题,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(Power Electronic Transformer, PET)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]。

收稿日期: 2018-06-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0903300)

作者简介: 郭世琦(1995-),男,河北籍,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行优化;

穆云飞(1984-),男,河北籍,副教授,博士,主要研究方向为电力需求侧响应、电力系统安全稳定性及新能源应用等。

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的阐述,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 PSCAD 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。

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。

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。为此,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。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,可以降低系统的运行成本,实现交直流混合系统运行的经济化。

2 含 PET 交直流混合系统介绍

2.1 含 PET 交直流混合系统

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 1 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系统和交流系统相连接。

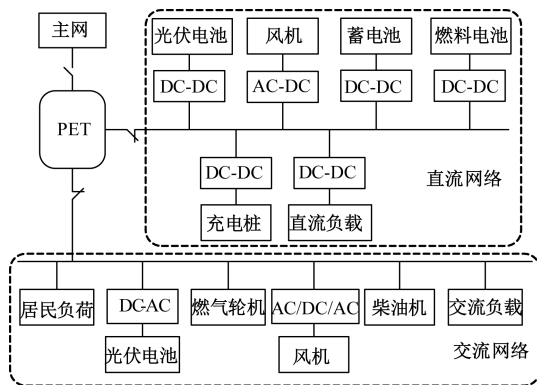


图 1 含 PET 交直流混合系统结构图

Fig. 1 Structure of AC/DC hybrid micro-grid with PET

直流系统中的分布式可再生能源主要是通过 DC-DC 变换器并网,交流系统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、电动汽车等可再生能源在本系统中采用直流接入方式,风力发电采用交流接入方式,储能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]。

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],例如当交流系统中发电有盈余,而此时直流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系统输送至直流系统,一方面这使得交直流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,使得系统中分布式可再生能源的出力得以充分消纳,提高了 DER 的使用比例,防止了“弃风弃光”现象的发生。同理,当直流系统中发电有盈余,交流系统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;当直流系统和交流系统同时有盈余时,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系统和直流系统中^[12]。

2.2 PET 稳态模型

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2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。

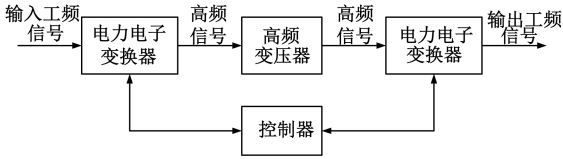


图2 电力电子变压器工作原理

Fig. 2 Power electronic transformer working principle

对于电力电子变压器的约束问题, 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3所示。

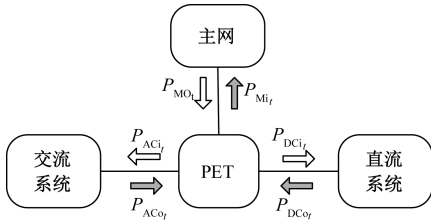


图3 PET 三端口等效模型

Fig. 3 PET three port equivalent model

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 $P_{M_{o_i}}$ 及无功功率 $Q_{M_{o_i}}$ 、从交流系统流向 PET 内部的有功功率 P_{ACo_i} 及无功功率 Q_{ACo_i} 、从直流系统流向 PET 内部的有功功率 P_{DCo_i} 、从 PET 内部流向交流系统的有功功率 P_{ACi_i} 及无功功率 Q_{ACi_i} 以及从 PET 内部流向直流系统的有功功率 P_{DCi_i} 。 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]。

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就地充分消纳, 所

以令 $P_{M_{i_t}}$ 恒为 0, 即不允许将电能从交直流系统输送到主网, 因此式(1)成立:

$$P_{ACo_i} + P_{DCo_i} + P_{Mo_i} = k_{PET}(P_{ACi_i} + P_{DCi_i}) \quad (1)$$

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:

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

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:

$$\sqrt{P_{ACo_i}^2 + Q_{ACo_i}^2} \leq S_{ACm} \quad (3)$$

$$P_{DCo_i} \leq P_{DCm} \quad (4)$$

2.3 微型燃气轮机模型

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:

$$0 \leq P_{MT_i} \leq P_{MT}^{\max} \quad (5)$$

$$P_{MT_{i+1}} - P_{MT_i} \leq RU_{MT} \quad (6)$$

$$P_{MT_i} - P_{MT_{i+1}} \leq RD_{MT} \quad (7)$$

式(5)对微型燃气轮机的发电功率进行了限制, 而式(6)和式(7)则对微型燃气轮机的斜坡上升和下降速率进行了控制, 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_i} 为微型燃气轮机在 t 时刻的输出功率; $P_{MT_{i+1}}$ 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; 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。

2.4 储能电池模型

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:

$$0 \leq P_{Bch_i} \leq X_{ch_i} P_{Bch}^{\max} \quad (8)$$

$$0 \leq P_{Bdch_i} \leq X_{dch_i} P_{Bdch}^{\max} \quad (9)$$

$$X_{ch_i} + X_{dch_i} \leq 1 \quad (10)$$

$$P_{B_i} \leq B_{cap} \quad (11)$$

式(8)和式(9)限制电池的充电和放电容量, 其中 P_{Bch_i} 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_i} 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_i} 和 X_{dch_i} 为考虑电池充放电循环而定义的“0/1”二进制变量。式(11)对电池储电容量进行了限制, 其中 P_{B_i} 为 t 时刻电池内储存的电能, B_{cap} 为电池的储存电能的上限值。

$t+1$ 时刻和 t 时刻电池内储存电能有如下关系:

$$P_{B,t+1} = P_{B,t} + P_{Bch,t} - P_{Bdch,t} \quad (12)$$

式(8)~式(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。

3 含 PET 的交直流混合系统优化模型

交直流混合系统 24h 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 (Mixed Integer Nonlinear Programming, 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系统总运行费用的最小化,本文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]。

3.1 优化问题的目标函数

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。其用数学表达式如式(13)所示:

$$\begin{aligned} \text{MinCost} &= f(P_{MT,t}, P_{B,t}, P_{Mo,t}) \\ &= \sum_t (Cost_{MT,t} + Cost_{B,t} + Cost_{Mo,t}) \\ &= \sum_t (\rho_{MT} P_{MT,t} + Cost_{B,t} + \rho_{Mo} P_{Mo,t}) \quad (13) \end{aligned}$$

式中, $Cost_{MT,t}$ 为微型燃气轮机在时间 t 内的发电成本; $Cost_{B,t}$ 为 t 时刻的电池成本; $Cost_{Mo,t}$ 为 t 时刻交直流混合系统在主网购电所花费成本; ρ_{MT} 为微型燃气轮机在 t 时刻的单位发电成本; ρ_{Mo} 为主网在 t 时刻的实时电价; $P_{Mo,t}$ 为 t 时刻交直流混合系统从主网所购电量。 $Cost_{B,t}$ 具体可由式(14)表示:

$$Cost_{B,t} = [c_B k_{SOC_{min}} (1 - SOC_{min})] P_{B,t} \quad (14)$$

式中, c_B 为电池的基本成本系数; $k_{SOC_{min}}$ 为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。

3.2 优化问题的约束条件

对于电力电子变压器、微型燃气轮机、储能电池的约束,式(1)~式(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。

交流系统的功率平衡约束为:

$$P_{MT,t} + P_{WP,t} + P_{AC,t} = P_{L_{AC,t}} + P_{ACo,t} \quad (15)$$

式中, $P_{WP,t}$ 为 t 时刻风机出力; $P_{L_{AC,t}}$ 为 t 时刻交流负荷的负荷量。

直流系统的功率平衡约束为:

$$P_{PV,t} + P_{PV-WP,t} + P_{DC,t} = P_{B,t} + P_{L_{DC,t}} + P_{DCo,t} \quad (16)$$

式中, $P_{PV,t}$ 为 t 时刻光伏电池的发电量; $P_{PV-WP,t}$ 为 t 时刻光伏风力发电系统的发电量; $P_{L_{DC,t}}$ 为 t 时刻直流负荷的负荷量。

4 算例分析

4.1 算例系统模型

含电力电子变压器的交直流混合系统结构图如图4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系统和直流系统连接外,还有一个端口与主网直接相连,当交直流系统中能量供应不足或者从主网购电经济性更好时,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系统中,以保证能量的供需平衡,主网实时电价数据在表1中给出。

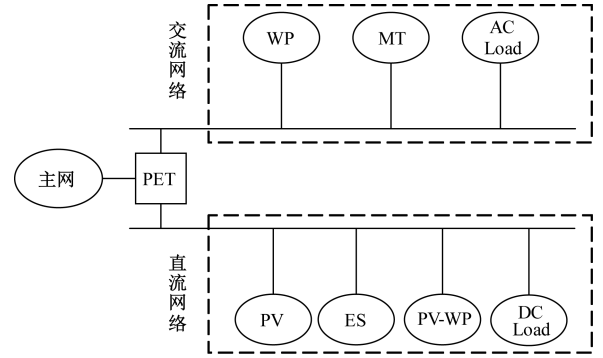


图4 含 PET 的交直流系统结构图

Fig. 4 Structure AC/DC hybrid micro-grid with PET

交流系统中包含微型燃气轮机 (Micro 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 24h 数据见表1, 风机 24h 发电量见表2。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。

表 1 交直流负荷及主网实时电价数据

Tab. 1 AC/DC load and main grid electricity price data

时间/ h	交流负荷 /kW	直流负荷 /kW	主网实时电价 /(元/(kW·h))
1	251.5	217.158	0.524843149
2	264.55	222.989	0.595059251
3	274.26	223.92	0.446405540
4	288.21	229.639	0.407075634
5	295.23	232.817	0.427962703
6	306.46	234.287	0.441072671
7	326.11	247.167	0.479735969
8	329.58	239.761	0.487068663
9	354.3	244.22	0.469071103
10	344.84	245.508	0.493956951
11	346.19	246.614	0.476180723
12	346.23	244.948	0.545285811
13	352.72	252.487	0.565506271
14	342.66	251.094	0.561728823
15	345.91	246.572	0.549285463
16	350.57	247.797	0.526398569
17	338.42	245.382	0.491068314
18	321.99	250.135	0.586615543
19	324.87	234.448	0.452627220
20	295.66	235.064	0.398631926
21	297.66	232.6	0.403964794
22	275.73	226.748	0.443516903
23	269.22	229.611	0.544397000
24	244.81	223.948	0.483291214

直流系统包括光伏发电装置 (Photovoltaic, PV)、储能装置(Energy Storage, ES)、光伏风力发电系统(Photovoltaic-wind Power System, PV-WP)、直流负荷(DC load), 直流负荷 24h 数据见表 1, 光伏发电单元及光伏风力发电装置 24h 发电量见表 2, 电池储能装置储存电能的上限值 $B_{\text{cap}} = 200\text{kW}$, 每小时电池充放电电量上限 $P_{\text{Bch}}^{\text{max}} = P_{\text{Bdch}}^{\text{max}} = 40\text{kW}$ 。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。在本文中, 对于光伏风力发电装置的具体原理不进行研究, 其在 24h 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。

电力电子变压器的可控制变量包括主网侧有功输出 P_{Mo_i} 、无功输出 Q_{Mo_i} 以及交流系统和直流系统侧的有功注入 P_{ACo_i} 和 P_{DCo_i} , 在算例中, 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

表 2 分布式发电装置发电量数据

Tab. 2 Distributed generation unit power generation data

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
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
21	120.312	106.3744	0
22	114.992	99.9904	0
23	120.624	106.7488	0
24	123.184	109.8208	0

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 , 对于交流系统和直流系统侧的有功注入 P_{ACo_i} 和 P_{DCo_i} , 设定其最大功率为 150kW 。

4.2 算例结果

基于 Matlab 平台的 yalmip 工具箱对混合整数非线性优化问题求解, 图 5 中给出了 24h 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/直流系统流出, 值为负则表示功率注入交流/直流系统, 从图 5 中可以看出, 在 1~8h 内由于光伏发电量很少, 直流系统中有功功率供不应求, 功率从交流系统流入直流系统; 在 9~16h 内, 由于光伏发电装置开始工作, 直流系统开始有能量盈余, 能量又开始从直流系统注入交流系统; 17~24h 内由于光伏发电量再次为 0, 功率再次由交流系统流入直流系统。在此情况下, 系统 24h 内的总花费为 2356.7 元, 含 PET 交直流混合系统日前调度结果见表 3。

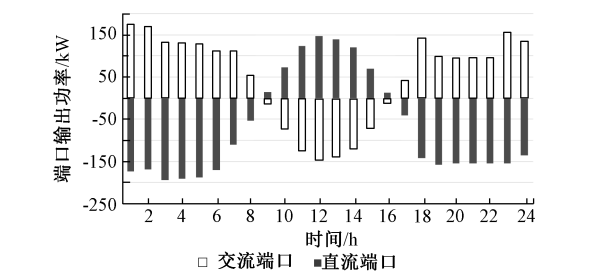


图5 PET交直流端口输出功率

Fig. 5 Output power of PET AC / DC port

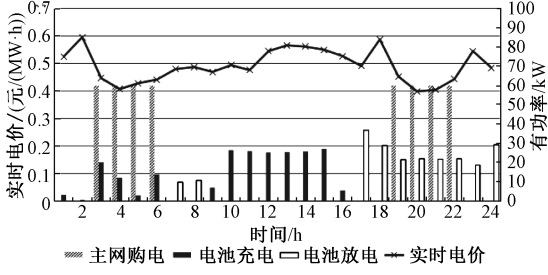


图6 主网功率注入和电池充放电安排

Fig. 6 Main grid power injection and battery charge and discharge arrangements

表3 含PET交直流混合系统日前调度结果

Tab.3 Day-Ahead optimal scheduling results of AC/DC hybrid system with PET

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

图6为电池的充放电优化结果及主网处功率注入的结果,图7给出光伏发电与电池充放电关系,为形象展示出两者间关系,此处光伏发电的功率值和电池充放电的功率值选择不同的坐标刻度。当主网的电能价格比交直流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6、图7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。

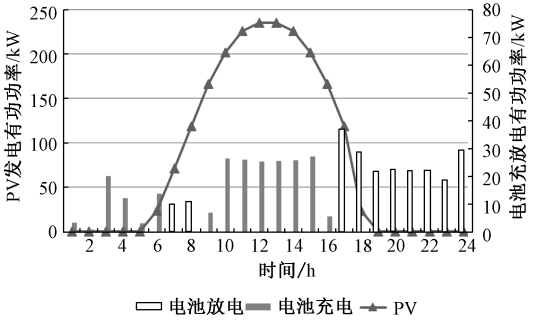


图7 光伏发电与电池充放电安排

Fig. 7 Photovoltaic generation and battery charge and discharge arrangement

在1~6h内电池进行充电,在这个时间段内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,实现了系统的供需平衡以及经济性,而且有效提高了系统的安全性。

5 结论

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,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,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。

通过对含 PET 的交直流混合系统进行日前优化调度可以得到如下结论: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、交流系统、直流系统中灵活传输,从而提高新能源的消纳能力,降低系统的运行成本,提高系统的经济性。

参考文献 (References):

- [1] 韩尚卿 (Han Shangqing). 交直流混合微电网运行控制关键技术研究 (Research of key technology on operation control of hybrid AC/DC microgrid) [D]. 北京: 北京交通大学 (Beijing: Beijing Jiaotong University), 2016.
- [2] 马剑 (Ma Jian). 交直流混合系统多元互补优化运行研究 (Study on multi-complementarity optimal operation of AC/DC hybrid microgrid) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2016.
- [3] 兰征, 涂春鸣, 肖凡, 等 (Lan Zheng, Tu Chunming, Xiao Fan, et al.). 电力电子变压器对交直流混合系统功率控制的研究 (The power control of power electronic transformer in hybrid AC-DC microgrid) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (23): 50-57.
- [4] 陈磊, 欧家祥, 张秋雁, 等 (Chen Lei, Ou Jiaxiang, Zhang Qiuyan, et al.). 电力电子变压器研究综述 (A review of studies on power electronic transformers) [J]. 电网与清洁能源 (Power System and Clean Energy), 2015, 31 (12): 36-42.
- [5] 廖国虎, 袁旭峰, 邱国跃 (Liao Guohu, Yuan Xufeng, Qiu Guoyue). 配电网电力电子变压器仿真研究 (Research on the simulation of the power electronic transformer in the distribution network) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2014, 51 (17): 35-41.
- [6] 刘海军, 李刚, 王志凯, 等 (Liu Haijun, Li Gang, Wang Zhikai, et al.). 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 (Research on medium and high-voltage smart distribution grid oriented power electronic transformer modeling and control strategies) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2017, 45 (2): 85-93.
- [7] 张学, 裴玮, 邓卫, 等 (Zhang Xue, Pei Wei, Deng Wei, et al.). 多源/多负荷直流微电网的能量管理和协调控制方法 (Energy management and coordinated control method for multi-source/multi-load DC microgrid) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (31): 5553-5562.
- [8] 狄开丽, 李鑫明, 李鹏, 等 (Di Kaili, Li Xinming, Li Peng, et al.). 基于改进黑洞算法的交直流混合系统优化运行 (Optimal operation of AC/DC hybrid microgrid based on coevolution improved black hole algorithm) [J]. 电力建设 (Electric Power Construction), 2016, 37 (10): 1-8.
- [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, 2017, 8 (3): 1305-1317.
- [10] 李鹏, 韩鹏飞 (Li Peng, Han Pengfei). 含高密度可再生能源的交直流混合微网模糊优化运行 (Fuzzy optimal operation of hybrid AC/DC microgrid with high-density renewable energy sources) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (9): 63-70.
- [11] 赵争鸣, 冯高辉, 袁立强, 等 (Zhao Zhengming, Feng Gaohui, Yuan Liqiang, et al.). 电能路由器的发展及其关键技术 (The development and key technologies of electric energy router) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2017, 37 (13): 3823-3834.
- [12] 田梁玉, 唐忠, 焦婷, 等 (Tian Liangyu, Tang Zhong, Jiao Ting, et al.). 基于多目标评判法的微电网经济性指标研究 (Economic indicators research of microgrid based on multi-objective evaluation method) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection & Control), 2016, 44 (19): 122-127.
- [13] 李双超, 凌跃胜, 庞天宇, 等 (Li Shuangchao, Ling Yuesheng, Pang Tianyu, et al.). 基于 AC/DC/AC 两级结构的隔离型电力电子变压器研究 (Research on power electronic transformer based on AC/DC and DC/AC two level structure) [J]. 电器与能效管理技术 (Electrical & Energy Management Technology), 2018, (6): 7-10.
- [14] 刘闯, 支月媚 (Liu Chuang, Zhi Yuemei). 混合级联式电力电子变压器拓扑结构及控制策略 (Hybrid cascaded power electronics transformer topology and control scheme) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2017, 41 (2): 596-603.
- [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, 9 (4): 3154-3165.
- [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 [A]. 2016 18th European Conference on Power

Electronics and Applications[C]. 2016. 1-9.

[17] Yan J, Zhu X, Lu N. Smart hybrid house test systems in a solid-state transformer supplied microgrid [A]. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting [C]. 2015. 1-5.

[18] 王优, 郑泽东, 李永东 (Wang You, Zheng Zedong, Li Yongdong). 中高压电力电子变压器拓扑与控制应用综述 (Review of topology and control application of medium and high voltage power electronic transformer) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (5): 1-10.

[19] 张祥龙, 周晖, 肖智宏, 等 (Zhang Xianglong, Zhou Hui, Xiao Zhihong, et al.). 电力电子变压器在有源配电网无功优化中的应用 (Power electronic transformer applied to optimization of reactive power in active distribution system) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2017, 45 (4): 80-85.

[20] 李鹏, 华浩瑞, 陈安伟, 等 (Li Peng, Hua Haorui, Chen Anwei, et al.). 基于二层规划模型的交直流混合微网源荷储协调分区优化经济调度 (Source-load-storage coordination partition optimal economic operation of AC/DC hybrid microgrid based on bilevel programming model) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (24): 6769-6779, 6931.

[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 [A]. IEEE International Conference on Power System Technology [C]. 2012. 1-6.

Day-ahead optimal scheduling of AC/DC hybrid distributed energy system with power electronic transformer

GUO Shi-qi¹, MU Yun-fei¹, CHEN Nai-shi², PU Tian-jiao², YUAN Xiao-dong³, LI Qiang³

- (1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China;
3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: This paper proposes a method to optimize AC/DC hybrid distributed energy system with power electronic transformer. First, the steady-state model of power electronic transformers under normal operation mode is established; subsequently, the model of AC/DC hybrid system containing power electronic transformers is established. The scheduling model to realize full consumption of distributed energy and economic optimization in AC/DC hybrid system is optimized. Finally, an example is used to verify the AC/DC system model with power electronic transformer. The results show that the power electronic transformer can be used in the AC/DC hybrid system, the power transfer function between the AC network and the DC network is controlled by the power regulation function of the power electronic transformer, which can effectively realize the full consumption of the distributed power generation. In addition, the application of power electronic transformer reduces the operating cost of the system and realizes the economical operation of the AC/DC hybrid system.

Key words: power electronic transformers; AC and DC hybrid systems; distributed energy resources; power system optimization dispatch