

基于热力系统储热控制的大规模风电消纳研究

王 羽

(水电水利规划设计总院,北京 100120)

摘要:针对电力系统大规模风电并网消纳问题,本文基于区域能源系统框架提出一种热力系统储热控制的方法。该方法通过引入储热装置和分布式热泵,提高热电联产机组的运行灵活性,满足风电功率日前调峰需求;同时,分布式热泵可以进一步提高系统调峰容量,促进风电消纳;最后,考虑建筑物储热特性和人体热舒适性,能够提高储热控制的灵活性,实现对风电波动的有效跟踪。仿真结果展示了储热控制方法对日前调峰和促进弃风消纳的效果,分析了热负荷特性对风电调峰效果的影响。

关键词:风电;热电联产;储热装置;建筑物储热

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)06-0139-06

0 引言

随着能源系统革命,能源结构发生巨大变化,风电等可再生能源比例逐年提高,尤其是在我国三北地区^[1-2]。然而,风电等可再生能源具有随机性和波动性,降低了系统灵活调节能力,风电并网消纳问题突出^[3-6]。同时,我国三北地区电网中存在着高比例的热电联产机组用于满足冬季巨大的采暖需求,运行在“以热定电”模式^[7],灵活调节能力极其有限,进一步加剧了弃风问题,采暖季弃风率高达30%以上。大规模风电和高比例热电联产的并存,造成了严重的弃风问题,给电力系统安全、经济运行带来诸多困难^[8]。根据现有研究,引入分布式热泵、电锅炉和储热装置,可以提高热电联产的运行灵活性,实现平抑风电波动的目的^[9-12]。

在中国北方地区,区域供暖系统很早就开始用于冬季采暖,而空调等分布式热泵很少被用于冬季采暖。另外,学者对分布式热电联产机组配合储热装置进行了研究^[13-15],但是针对大型热电联产机组配置储热装置的研究还相对较少。进一步地,利用建筑物热惯性和人体热舒适性提高热负荷的灵活调节能力已成为电力系统的研究热点^[16-18]。但是,如何将现有空调热泵引入区域供暖,并利用多种储热技术提高电力系统灵活性,还缺乏相应的研究。由此,文中基于区域能源系统框架,提出了一种联合大型储热装置和建筑物储热的热力系统储热控制方法,用于促进风电消纳。

1 原理概述

区域能源系统(如图1所示)以大型燃煤热电

联产机组为核心,并配有大型热水储热装置和分布式热泵。其中,热电联产机组和分布式热泵作为热源向用户提供热能,满足其采暖需求。进一步,通过优化控制热水储热装置,并利用建筑物储热特性和用户热舒适需求特性,提高整个区域能源系统的运行灵活性,由此在日前优化调度中向电网提供调峰容量,促进大规模风电消纳。

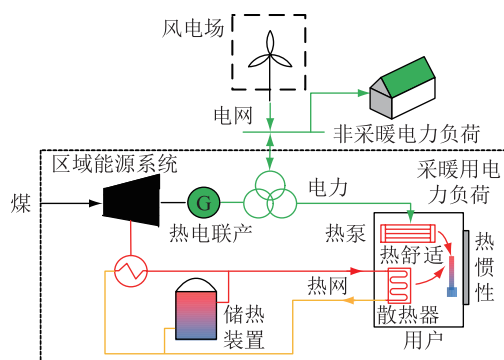


图1 区域能源系统基本框架

Fig.1 District energy system

首先,大型热水储热装置具有成本低的特点,可以充分地匹配大型热电联产机组的供热容量,并通过优化控制其蓄、放热,实现在热负荷低谷蓄热,在热负荷高峰放热的运行方式,满足了采暖负荷的需求。根据图2的热电联产机组运行工况,随着热出力的逐渐增加,热电联产机组的功率调节范围在逐渐减小,机组调峰能力逐渐减弱,通过储热装置放热,减小热电联产机组的热出力,进而提高热电联产机组的发电出力调峰能力,实现机组的向上调峰,用于补偿风电功率的不足。

其次,空调等分布式热泵在中国城市里普及度较高,但一般仅用于满足夏季制冷需求。如果充分利用分布式热泵的供热能力,代替热电联产的部分

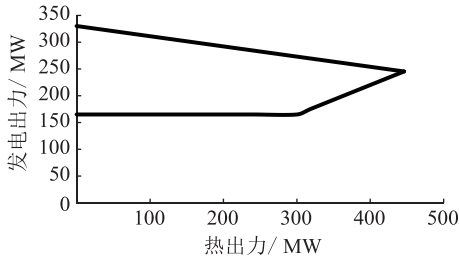


图2 CN300/200-16.7型热电联产机组运行工况

Fig.2 P-Q chart of CN300/200-16.7 extraction condensing turbine CHP

采暖负荷,既可以利用过剩的风电满足采暖需求,也可以提高热电联产的运行灵活性,满足电网中的风电调峰需求。

最后,北方地区建筑物具有巨大的蓄热能力。当供暖量大于采暖负荷时,热量储存在建筑物中时,室内温度升高;当供暖量小于采暖负荷时,热量从建筑物中释放,室内温度下降。进一步,考虑到人体热舒适性,室内温度可在一定的舒适温度范围内波动,而通过优化控制热电联产机组和分布式热泵的供暖功率,改变建筑物的热平衡状态,使建筑物不断的蓄、放热,从而为电网提供更大的调峰能力,实现对风电波动的追踪。

2 数学模型

2.1 目标函数

大规模风电并网会导致电网负荷峰谷差和波动率的增加。因此,文中以等效负荷的标准差最小作为目标函数,如式(1)所示:

$$\text{Min} \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T [P_{\text{eq}}(t) - \bar{P}_{\text{eq}}]^2}{T}} \quad (1)$$

式中:调整后的等效负荷 $P_{\text{eq}}(t)$ 可以由式(2)表示; \bar{P}_{eq} 为调整后等效负荷的平均值。

$$P_{\text{eq}}(t) = P_1(t) - P_w(t) - P_{\text{CHP}}(t) + P_{\text{EHPs}}(t) \quad (2)$$

式中: $P_1(t)$ 为电力负荷; $P_w(t)$ 为可利用风电功率; $P_{\text{CHP}}(t)$ 为热电联产机组的发电出力; $P_{\text{EHPs}}(t)$ 为分布式热泵的耗电功率。

2.2 热电联产机组运行约束

热电联产机组的发电出力受到其上、下限约束和爬坡约束,如式(3)和(4)所示:

$$P_{\text{CHP}}^{\text{min}}(t) \leq P_{\text{CHP}}(t) \leq P_{\text{CHP}}^{\text{max}}(t) \quad (3)$$

$$P_{\text{CHP}}(t) - R_{\text{ramp}} \frac{\Delta t}{60} \leq P_{\text{CHP}}(t+1) \leq P_{\text{CHP}}(t) + R_{\text{ramp}} \frac{\Delta t}{60} \quad (4)$$

式中: R_{ramp} 为热电联产机组最大爬坡速度; Δt 为时间步长; P_{CHP} 调整范围受 R_{ramp} 约束。 $P_{\text{CHP}}^{\text{min}}(t)$ 和 $P_{\text{CHP}}^{\text{max}}(t)$ 受到热电联产机组热出力的限制,如式(5—7)所示:

$$P_{\text{CHP}}^{\text{min}}(t) = l_{\text{CHP}}^{\text{min}} P_{\text{hot}}(t) + n_{\text{CHP}}^{\text{min}} \quad (5)$$

$$P_{\text{CHP}}^{\text{max}}(t) = l_{\text{CHP}}^{\text{max}} P_{\text{hot}}(t) + n_{\text{CHP}}^{\text{max}} \quad (6)$$

$$0 \leq P_{\text{hot}}(t) \leq P_{\text{hot}}^{\text{max}}(t) \quad (7)$$

式中: $l_{\text{CHP}}^{\text{max}}$, $n_{\text{CHP}}^{\text{max}}$, $l_{\text{CHP}}^{\text{min}}$, $n_{\text{CHP}}^{\text{min}}$ 分别为热电机组运行工况的上、下限约束常数; $P_{\text{hot}}^{\text{max}}(t)$ 为热电机组最大热出力。

2.3 蓄热控制约束

t 时刻储热装置的累积蓄热量 $C_{\text{TES}}^{\text{end}}(t)$ 如式(8)所示:

$$C_{\text{TES}}^{\text{end}}(t) = \begin{cases} C_{\text{TES,ini}} + \Delta t [P_{\text{TES,in}}(t) - P_{\text{TES,out}}(t)] & t = 1 \\ C_{\text{TES}}^{\text{end}}(t-1) + \Delta t [P_{\text{TES,in}}(t) - P_{\text{TES,out}}(t)] & t > 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $C_{\text{TES,ini}}$ 为储热装置某日的初始蓄热量; $P_{\text{TES,in}}(t)$ 储热装置的蓄热功率; $P_{\text{TES,out}}(t)$ 为储热装置的放热功率。另外, $C_{\text{TES}}^{\text{end}}(t)$, $P_{\text{TES,in}}(t)$, $P_{\text{TES,out}}(t)$ 受到式(9)和(10)的约束,如下:

$$0 \leq C_{\text{TES}}^{\text{end}}(t) \leq C_{\text{TES}}^{\text{max}} \quad (9)$$

$$P_{\text{TES,in}}(t) \leq P_{\text{TES,in}}^{\text{max}} \quad (10)$$

$$P_{\text{TES,out}}(t) \leq P_{\text{TES,out}}^{\text{max}}$$

式中: $C_{\text{TES}}^{\text{max}}$ 为储热装置的最大蓄热容量; $P_{\text{TES,in}}^{\text{max}}$ 为储热装置的最大蓄热功率; $P_{\text{TES,out}}^{\text{max}}$ 为储热装置的最大放热功率。

2.4 热负荷控制约束

用户总耗热功率 $P_{\text{end}}(t)$, 由热电联产的热出力 $P_{\text{water}}(t)$ 和分布式热泵的热功率 $P_{\text{h,EHPs}}(t)$ 共同承担,如式(11)所示:

$$P_{\text{end}}(t) = P_{\text{water}}(t) + P_{\text{h,EHPs}}(t) \quad (11)$$

式中:热电联产的热出力 $P_{\text{water}}(t)$ 为热电联产机组的出力和储热装置的蓄放热功率的叠加,见式(12):

$$P_{\text{water}}(t) = P_{\text{hot}}(t) + P_{\text{TES,out}}(t) - P_{\text{TES,in}}(t) \quad (12)$$

同时,分布式热泵的热功率受到其额定容量 P_{CAP} 和性能系数 C 的约束,如式(13)和(14)所示:

$$0 \leq P_{\text{h,EHPs}}(t) \leq P_{\text{CAP}} \quad (13)$$

$$P_{\text{h,EHPs}}(t) = C \cdot P_{\text{EHPs}}(t) \quad (14)$$

2.5 建筑物储热和人体热舒适约束

由于建筑围护结构的热惰性,建筑物可以被认为是一个储热装置。根据能量守恒定律,其储热特性可以由式(15)表示:

$$T(t) = \exp\left(-\frac{KF}{c_{\text{air}}\rho_{\text{air}}V}\Delta t\right) [T(t-1) - T_{\text{out}}(t) - P_{\text{hot}}^{\text{end}}(t) \frac{1}{KF}] + [T_{\text{out}}(t) + P_{\text{hot}}^{\text{end}}(t) \frac{1}{KF}] \quad (15)$$

式中: $T(t)$ 为室内温度; $T_{\text{out}}(t)$ 为室外温度; $P_{\text{hot}}^{\text{end}}(t)$ 为用户的耗热功率; K 为建筑物平均导热系数; F 为建筑物外表面积; V 为建筑物体积; c_{air} 和 ρ_{air} 为空气比热容和空气密度。

最后,考虑到人体热舒适性,室内温度可以在上限温度 T_{up} 和下限温度 T_{down} 范围内波动:

$$T_{\text{down}} \leq T(t) \leq T_{\text{up}} \quad (16)$$

3 算例仿真

本文设计了3个对比算例,其中,算例 I 为热电联产“以热定电”的原始控制方法,算例 II 为不考虑储热的控制方法,算例 III 为本文所提储热控制方法,具体如表 1 所示。模型为典型的非线性规划(NLP)问题,利用 GAMS/MOSEK 求解器进行求解。

表 1 对比算例
Tab.1 Comparison cases

算例	分布式热泵	储热装置	建筑物储热
算例 I	×	×	×
算例 II	√	×	×
算例 III	√	√	√

(1) 风电数据。基于天气数值预报和人工神经网络的风电预测系统早已应用于电网调度中心^[19]。根据风电预测规范,本文选用了分辨率为 15 min,时长为 24 h 的冬季风电预测功率曲线作为算例仿真对象,如图 3 所示。

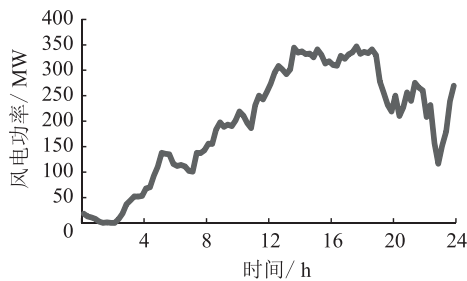


图 3 预测风电功率

Fig.3 Prediction wind power curve

(2) 电力负荷数据。预测电力负荷曲线如图 4 所示。

(3) 采暖负荷。早晚温差的变化导致了采暖负荷需求的波动,而室外温度的日峰谷差是温度变化的典型指标之一。由此,本文根据室外温度日峰谷差的不同,选择了 3 条峰谷差不同的采暖热负荷曲线作为对比算例,如图 5 所示。

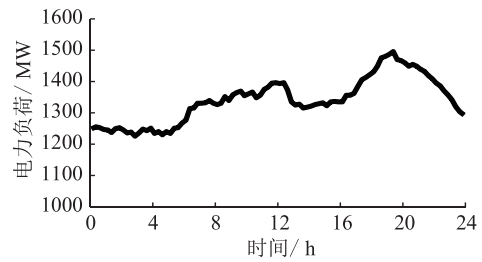


图 4 电力负荷曲线

Fig.4 Electricity load

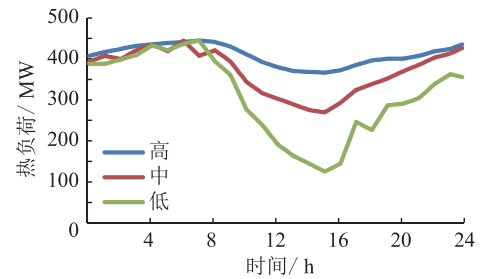


图 5 典型采暖热负荷曲线

Fig.5 Space heating load

(4) 区域供暖系统参数。区域能源系统包含一台 CN300/200-16.7 型号的抽凝机组,其热电耦合特性如图 2 所示:热出力为 0 MW 时,其最大发电出力为 330 MW,最小出力为 165 MW;最大热出力 445 MW 时,发电出力固定在 250 MW,热出力拐点为 300 MW。另外,热电机组的最大爬坡速度设为 3.3 MW/min。一台容量为 2000 MW·h 的大型热水蓄热罐和热电联产机组配合使用,其最大热输出和蓄热功率设为 500 MW。建筑物的平均导热系数为 0.5 W·m⁻²·°C⁻¹,空气比热容为 1.007 kJ·kg⁻¹·°C⁻¹,空气密度为 1.2 kg·m⁻³。热舒适温度上、下限分别设为 18 °C 和 22 °C。

4 结果与分析

4.1 电力负荷优化控制结果

图 6 展示了不同算例下的分布式热泵耗电功率和热电联产机组发电出力时序曲线。利用本文所提储热控制方法(算例 III),一方面引入了分布式热泵耗电功率,实现对等效负荷(如图 7)的跟踪,可以提供的额外调峰容量达到 150 MW;另一方面,这也改善了热电联产机组的发电出力灵活性,使其最大出力显著提高(算例 III 中 20:00 时),最大调峰容量提高了 30 MW。进一步,算例 II 并未考虑热力系统的联合储热控制,虽然热泵依然能提供很好的调峰能力,但是热电机组的调峰能力相比算例 I 并未有改善,因为调整后的等效负荷在峰谷时间段平滑效果较差(如图 7),可见联合储热对提高热电机组的

调峰能力(算例Ⅲ)方面具有重要作用。由此,分布式热泵代替部分供暖,可以提供巨大的调峰潜力,而考虑储热装置和建筑物热惯性的联合储热控制是提高热电联产机组调峰能力的关键。

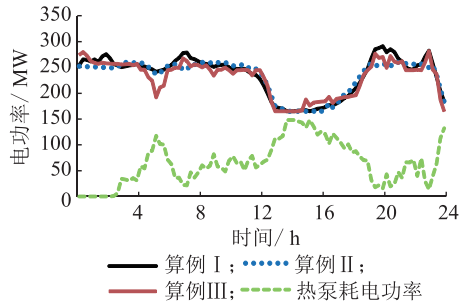


图6 热电机组和分布式热泵的电力负荷分配
Fig.6 The Electricity dispatch for CHP and EHPs

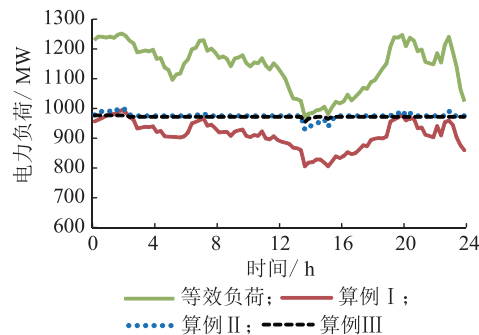


图7 调整后的等效负荷曲线

Fig.7 The adjusted equivalent load

图7给出了待调整的等效负荷和算例Ⅰ、算例Ⅱ、算例Ⅲ中调整后的等效负荷。等效负荷就是电力负荷和风电功率之差,由于风电的逆调峰特性,等效负荷的峰谷差和波动率要明显大于原始电力负荷。算例Ⅱ和算例Ⅲ中调整后的等效负荷要明显比算例Ⅰ中的更平滑,特别是算例Ⅲ几乎为一条直线,而算例Ⅰ和原始等效负荷的峰谷差为281 MW和188 MW。可见,本文所提储热控制方法,能够有效地利用热电联产机组和分布式热泵跟踪等效负荷,从而减小等效负荷的波动。

4.2 热负荷和储热优化结果

图8展示了储热控制后的热负荷分配结果。可见,热负荷由热电联产机组和分布式热泵共同承担,且由于考虑了建筑物储热特性,供热功率和热负荷需求并不是实时平衡的。当总供热功率大于热负荷时,建筑物储热,室内温度升高;当总的供热功率小于热负荷时,建筑物放热,室内温度降低。图9展示了室内温度的变化情况。一方面分布式热泵可以通过分担热电联产机组的采暖负荷,来提高机组的运行灵活性。另一方面,利用建筑物储热特性,分布式热泵可以更好地跟踪风电或者是等效负

荷的波动,这也可以用来解释室内温度波动的规律。

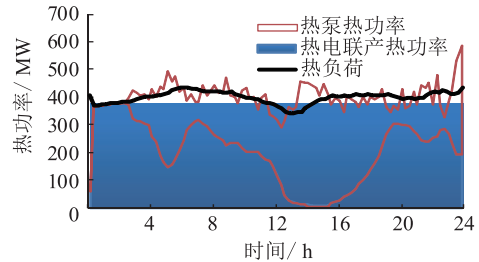


图8 热电机组和分布式热泵的热负荷分配

Fig.8 The heating load dispatch for CHP and EHPs

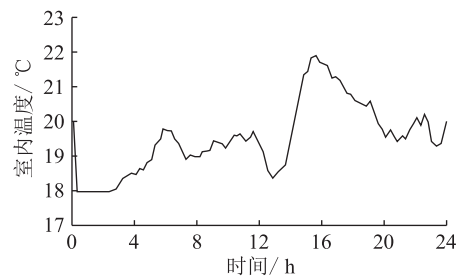


图9 室内温度曲线

Fig.9 The variation of indoor temperature

图10展示了储热装置的蓄、放热功率。可见,储热装置在热负荷低谷进行蓄热,而在热负荷的高峰放热,用来补偿热电联产机组的热水出力,达到提高热电联产机组发电出力灵活性的目的。这样,储热装置的蓄、放热功率也能够很好的匹配热电联产机组的热水出力。

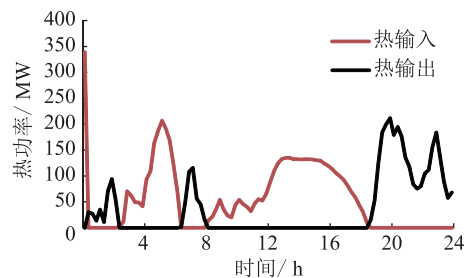


图10 储热装置的蓄放热功率

Fig.10 The heat input and output of TES

进一步地,分布式热泵的供热功率和储热装置的蓄放热功率能够很好地相互配合。例如,从12:00—14:00,分布式热泵供暖可以有效地降低热电联产机组的热水出力,使得更多的热水出力可以用来满足储热装置蓄热需求。然后,在等效负荷高峰的时候,存储在储热装置中的热水能够补充热电联产机组的热水出力,提高热电联产机组的灵活性,来跟踪等效负荷的波动。

4.3 热负荷类型的影响分析

图11展示了3种典型热负荷下调整后的等效负荷。可见,随着热负荷水平的提高,调整后的等

效负荷逐渐降低,尤其是在等效负荷低谷时段(12:00—16:00),等效负荷最小值分别为954 MW、931 MW和870 MW。这主要是因为较低的热负荷需求限制了分布式热泵的使用,无法充分地利用分布式热泵的耗电功率去补偿低估电力负荷。

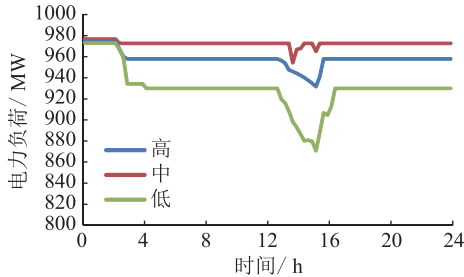


图 11 不同类型热负荷下的等效负荷调整效果

Fig.11 The adjusted equivalent load for three typical space heating load

由此,如表 2 所示,由于采暖热负荷需求的限制,分布式热泵总的耗电量随着热负荷水平的降低而减少,其值分别为 1564 MW, 1266 MW, 731 MW。另外,随着分布式热泵耗电量的减少,热电联产机组发电出力的峰谷差明显增加(从 126 MW 增加到 155 MW),用来补偿分布式热泵调峰能力的不足,而热电联产机组调峰能力的增加,可以归因于储热装置热输出的增加(如表 2,从 868 MW·h 增加到 1056 MW·h)。综上,由于热负荷的不同,导致了热泵调峰能力、热电联产机组调峰能力,甚至是储热装置热输出的变化,而三者的变化趋势则存在着此消彼长的关系。一方面,在总热负荷有限的情况下,总的调节效果受到热泵调峰能力的影响较大;另一方面,热泵获得巨大调峰能力是以牺牲热电机组的调节能力为代价的。在电力市场环境下,这是值得进一步考虑的一个因素。

表 2 不同类型热负荷下的结果比较

Tab.2 The different results for space heating load

热负荷水平	分布式热泵耗电功率/(MW·h)	热电机组发电出力峰谷差/MW	储热装置热输出功率/(MW·h)
高	1 564.53	126.22	868.12
中	1 266.66	135.68	943.22
低	731.60	155.90	1 056.56

4.4 弃风电量分析

图 12 展示了不同调峰容量和热负荷类型下的弃风情况。文中调峰容量指的是除热电联产机组外,所有机组的最小出力。显然,在相同的调峰容量下,由于采用了储热调度方法,算例 III 的弃风电量更少,某些情况下甚至为 0。另外,采用储热调度后,弃风电量会受到热负荷类型的影响,随着热负

荷水平的逐渐降低而增加,如算例 III 中调峰容量为 900 MW 时,当热负荷水平下降到最大热负荷的 75%时,其弃风电量略微增加到了 30 MW·h。由此可见,较低的热负荷水平能够增加热电联产机组的运行灵活性,但是不利于分布式热泵用于调峰,尤其是在风电过剩的时候。

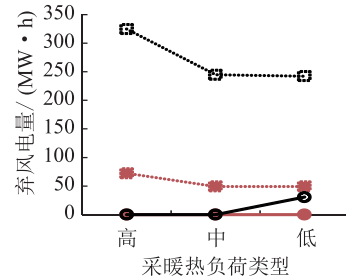


图 12 弃风电量

Fig.12 The abandoned wind power

5 结论

本文提出了一种热力系统储热控制方法,用来促进电力系统大规模风电的消纳。该方法以包含大型热电联产机组的区域能源系统为基本框架,引入大型储热装置、分布式热泵,考虑建筑物储热特性和人体热舒适需求特性,从而满足电力系统日前风电调峰的需求。最后,通过对比算例的分析,获得以下结论:

(1) 本文热力系统储热控制方法能够增加热电联产机组发电出力的灵活性,同时由于分布式热泵的快速跟踪作用,降低了热电联产机组发电出力的波动率。

(2) 考虑建筑物储热特性和人体热舒适需求特性,分布式热泵的耗电功率能够实现对等效负荷(电力负荷与风电功率之差)的有效跟踪,同时也带来了室内温度的变化。

(3) 分布式热泵的控制和储热装置的控制能够更好地实现优化匹配。分布式热泵的运行能够促进储热装置的蓄热作用,这有利于提高热电联产机组的热、电出力灵活性。

(4) 分布式热泵的耗电功率受到热负荷水平的限制,较低的热负荷会不利于其跟踪较高的电力负荷或较低的风电功率。

(5) 在电力系统调峰容量不足时,储热控制方法对减少系统弃风具有很好的效果。

参考文献:

- [1] ZHANG X, CHANG S, ERIC M. Renewable energy in China: An integrated technology and policy perspective [J]. Energy

- Policy, 2012, 51(6):1-6.
- [2] 吴志明,杨天蒙. 风光火大型能源基地联合外送优化配置[J]. 广东电力,2018,31(6):68-74.
WU Zhiming, YANG Tianmeng. Optimization configuration for hybrid power transmission of wind power, photovoltaic and thermal power[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(6):68-74.
- [3] 吴小珊,张步涵,袁小明,等. 求解含风电场的电力系统机组组合问题的改进量子离散粒子群优化方法[J]. 中国电机工程学报,2012,33(4):45-52.
WU Xiaoshan, ZHANG Buhuan, YUAN Xiaoming, et al. Solutions to unit commitment problems in power systems with wind farms using advanced quantum-inspired binary PSO[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 33(4):45-52.
- [4] 孙荣富,张涛,梁吉. 电网接纳风电能力的评估及应用[J]. 电力系统自动化,2011,35(4):70-76.
SUN Furong, ZHANG Tao, LIANG Ji. Evaluation and application of wind power integration capacity in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4):70-76.
- [5] 禚培正,雷佳,华栋,等. 消纳大规模风电的电力系统源荷协同调度[J]. 广东电力,2016,29(8):11-16.
XUAN Peizheng, LEI Jia, HUA Dong, et al. Source-load coordination dispatching for power system considering large-scale wind power accommodation[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(8):11-16.
- [6] 王中夫,华栋. 消纳大规模风电并网的多目标鲁棒调度[J]. 广东电力,2016,29(6):35-42,49.
WANG Zhongfu, HUA Dong. Multi-objective robust dispatching for large-scale wind power grid-connection absorption[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(6):35-42,49.
- [7] 马建伟,葛挺,荆百林,等. 热电联产机组的节能发电调度技术与实践[J]. 中国电力,2009,42(4):14-19.
MA Jianwei, GE Ting, JING Bailin, et al. The research and practice for energy conservation and emissions reduction dispatch of cogeneration unit[J]. Electric Power, 2009, 42(4):14-19.
- [8] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报,2010,30(25):1-9.
ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25):1-9.
- [9] MATHIESEN B V, LUND H. Comparative analyses of seven technologies to facilitate the integration of fluctuating renewable energy sources[J]. Iet Renewable Power Generation, 2009, 3(2):190-204.
- [10] YANG Y, LONG H, WU K, et al. Integrated electricity and heating load control based on smart grid technology[C]// China International Conference on Electricity Distribution. IEEE, 2013:1-5.
- [11] UMMELS B C, GIBESCU M, PELGRUM E, et al. Impacts of wind power on thermal generation unit commitment and dispatch[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1):44-51.
- [12] STRECKIENE G, MARTINAITIS V, ANDERSEN A N, et al. Feasibility of CHP-plants with thermal stores in the German spot market[J]. Applied Energy, 2009, 86(11):2308-2316.
- [13] LUND H, ANDERSEN A N. Optimal designs of small CHP plants in a market with fluctuating electricity prices[J]. Energy Conversion & Management, 2005, 46(6):893-904.
- [14] CHRISTIDIS A, KOCH C, POTTEL L, et al. The contribution of heat storage to the profitable operation of combined heat and power plants in liberalized electricity markets[J]. Energy, 2012, 41(1):75-82.
- [15] FRAGAKI A, ANDERSEN A N, TOKE D. Exploration of economical sizing of gas engine and thermal store for combined heat and power plants in the UK[J]. Energy, 2008, 33(11):1659-1670.
- [16] ZHANG Y, LIN K, ZHANG Q, et al. Ideal thermophysical properties for free-cooling (or heating) buildings with constant thermal physical property material[J]. Energy & Buildings, 2006, 38(10):1164-1170.
- [17] ASTE N, ANGELOTTI A, BUZZETTI M. The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings[J]. Energy & Buildings, 2009, 41(11):1181-1187.
- [18] ALMESRI I F, AWBI H B. Predictions of thermal comfort in stratified room environment[J]. Building Simulation, 2011, 4(2):169-180.
- [19] 曹阳,李鹏,袁越,等. 基于时序仿真的新能源消纳能力分析及其低碳效益评估[J]. 电力系统自动化,2014,38(17):60-66.
CAO Yang, LI Peng, YUAN Yue. Analysis on accommodating capability of renewable energy and assessment on low carbon benefits based on time sequence simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17):60-66.

作者简介:



王羽

王羽(1986—),女,硕士,工程师,从事新能源发电技术及政策研究和新能源发电信息平台设计开发工作(E-mail:wangyu_andy@126.com)。

(下转第155页)

Terminal Fault and Simulation Analysis of 220 kV Cable Line

CAO Jingying¹, ZHA Xianguang², CHEN Jie¹, ZHOU Yuanxiang³, ZHANG Yunxiao³, TAN Xiao¹, HU Libin¹

(1. State Grid Power System Artificial Intelligence Joint Laboratory (Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute), Nanjing 211103; 2. Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024; 3. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: In order to analyze the deep cause of fault for surface fitting state between stress cone and cable body, this paper carries out cable disintegration, X-ray inspection, material inspection and simulation work for a 220 kV fault cable terminal. It is found that the interference fit on joint stress cone is higher than the installation process requirement, and the lap joint is not flat. When the stress cone and cable body surface are well bonded, the maximum electric field strength of the stress cone and the main insulation of the cable under operating voltage are much smaller than the breakdown field strength of the corresponding insulating material. When there is a small air gap between the stress cone and the cable surface, the internal electric field strength of the air gap is greater than the air breakdown field strength under the operating voltage, indicating that there is a discharge phenomenon inside the air gap under the operating voltage. Therefore, when the cable terminal stress cone, the cable surface is poorly attached, and there is a slight air gap at the interface, the main insulation damage caused by long-term discharge inside the air gap is the cause of the cable failure under the operating voltage.

Key words: 220 kV cable terminal; failure; interference volume

(编辑 方 晶)

(上接第 144 页)

Large Scale Wind Power Consumption Based on Heat Storage Control of Thermal System

WANG Yu

(China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: In terms of large scale wind power integrated into the power system. Based on the framework of regional energy system, a heat storage control method for thermal system is proposed in this paper. By introducing heat storage device and distributed heat pump this method can improve the operational flexibility of cogeneration unit and the peak regulation demand of wind power is met. At the same time, the distributed heat pump can further improve the peak regulation capacity of the system and improve the wind power consumption. Finally, considering the characteristics of building heat storage and human thermal comfort, it can improve the flexibility of heat storage control and realize the effective tracking of wind power fluctuation. The simulation results show the effect of heat storage control method on the peak regulation, and also analyze the influence on peak regulation of wind power with different heat load characteristics.

Key words: wind power; cogeneration; heat storage device; building heat storage

(编辑 方 晶)

(上接第 150 页)

Analysis and Optimization of Overvoltages in UHVDC Project Caused by Exiting of Converter

YU Xiang, CHEN Le, ZOU Qiang, XU Bin, WANG Yangzheng, YANG Jianming

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: The entrance/exiting of converter is one of the key techniques of UHVDC project. When telecommunication between stations is lost, the exiting of one converter at rectifier side due to fault sometimes would cause overvoltages of the rest converter in series. In this paper, the overvoltages are analyzed from the perspective of control strategy and an optimized strategy, which adjusts the voltage reference at rectifier side and current margin at inverter side respectively, is purposed. The real time digital simulator (RTDS) simulation results prove that the optimized strategy can effectively suppress the overvoltages under the circumstances mentioned above and can be adopted in future UHVDC projects.

Key words: UHVDC; telecommunication between stations; exiting of converter; overvoltage; voltage reference; current margin

(编辑 方 晶)