

基于混合储能的大型风电场优化控制

陈 谦,陈霄逸,金宇清,卮灵川,周 锦

(河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100)

摘要:波动性电源的大规模接入,不仅造成电力系统运行调度困难,而且会影响其安全稳定运行。因此,通过配置储能装置来对并网功率进行平滑控制十分必要。基于一定配置容量的混合储能系统(HESS),提出一种用于大型风电场并网的最优控制方法。采用蓄电池和超级电容为储能介质,建立短期优化控制的动态模型,确立相应的控制目标和约束条件,并设计基于粒子群优化(PSO)的求解算法。仿真算例的结果表明该方法是正确、有效的。

关键词:风电场;储能;混合储能;超级电容;蓄电池;优化;控制;并网;模型;调度

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.010

0 引言

智能电网建设和清洁可再生能源的大规模开发利用已成为当前电力系统发展的必然趋势。然而,风电、光伏等清洁能源具有显著的波动性、间歇性、随机性特点。若其大规模接入电力系统,不仅带来运行调度困难,甚至还会危及电网的安全性和稳定性^[1-3]。因此,通过配置大规模储能系统来有效平抑风电、光伏等并网功率波动,已成为现阶段重点研究课题之一。

国内外大量研究资料表明,利用储能系统可在一定程度上提升电网接纳波动性电源能力、提高电网安全可靠运行、改善电能质量。目前,中国、美国及日本均已有多项示范工程投入运行,并取得了大量的研究成果^[4]。

研究表明,超级电容和蓄电池是2种发展相对成熟的储能方式。超级电容功率密度高,能量密度低,使用寿命长,充放电时间为数毫秒到数十秒。蓄电池能量密度高,功率密度低,充放电时间比超级电容长^[5]。由于自身的缺陷,单一储能并不能充分发挥其应有的作用,因此,当前的研究提出采用混合储能替代单一储能的方式。这样,既弥补了单一储能方式带来的不足,同时也可大幅度提高储能系统的功率、能量控制能力。例如,采用超级电容和蓄电池组成混合系统,可用于大型风电场的并网功率调节。文献[6]设计了一种超级电容/蓄电池混合储能系统,在机组层面快速、高效地吞吐功率,平抑功率波

动。文献[7]将风电功率波动分为高频分量和低频分量,高频分量由超级电容平抑,低频分量由蓄电池平抑,并设计了控制电路。

目前,基于混合储能系统的风电场并网相关的研究工作,主要集中在2个方面:在规划方面,侧重于研究如何配置最小容量的储能系统,使风电场满足特定输出要求^[8-13];在运行方面,围绕大规模风电场接入对电力系统调峰调频以及平滑风力发电机机组出力,设计相应的控制策略及控制电路^[14-17]。

储能技术的应用,在运行控制与规划设计问题中具有明显的不同点。在规划设计问题中,主要考虑在满足一定性能要求下,实现配置的最经济。然而,就运行控制方面而言,风电场自身的运行状态与最初的规划并不完全吻合。同时,受运行成本的限制,通常配置的储能容量也都是有限的,这样可能会使风电场达不到预期平滑输出的要求。因此,需要充分利用有限的调节容量,使风电场的总体输出特性在一定的控制时段达到最好。

综上,针对大规模混合储能装置运行特性,结合风电场出力预测、系统调度,对储能装置进行优化控制是未来进一步研究的重点。本文以一个配置储能系统的大型风电场为例,在机组、风电场和系统3个层面的运行控制体系基础上,建立了风电场级通用的短期运行优化控制动态模型。该模型主要结合风电场的短期/超短期运行控制,并体现了动态的优化目标。随后,确立了相应的约束条件,并设计了求解算法。

1 风电场的运行控制框架

研究表明,风电场由于其波动性以及预测的偏差,造成了电力系统运行调度的困难。在一定时间内,调度中心需要频繁地调动传统调峰容量。由于调峰容量需求增加,对系统供电质量和安全运行带来

收稿日期:2014-05-19;修回日期:2015-01-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51190102,51377046);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB228204);国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA05A103)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51190102,51377046),the National Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB228204) and the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA05A103)

危害。因此,目前的研究提出,风电场需要具备一定的自我调节能力,减轻对电力系统运行调度的压力。如风电场采用弃风的方法,可以起到一定的输出控制能力。这种方法虽然简便,不需要额外投资,但是却不能最大化地利用风能。因此,近年来为风电场配置储能装置,成为相应的研究重点。

1.1 储能装置的配置方式

采用蓄电池/超级电容构成的混合储能系统通过电力电子装置与风电场相连,通常可分为集中配置和分散配置^[18]。由于本文重点研究风电场输出的短期优化控制,因此建模过程中对集中配置或分散配置不加区分。

一组蓄电池的模型可近似看作一个理想等效直流电压源串联等效内阻。本文所指的电池是风电场内配置的所有蓄电池的综合,且不考虑电池组的具体位置,各电池组都在场级控制器的协调下工作。

综合后的电池模型如式(1)所示:

$$\lambda_1 = \frac{E_1}{E_{1\max}} \quad (1)$$

其中, E_1 为电池的剩余电量; $E_{1\max}$ 为电池的额定容量; λ_1 为电池的荷电状态 SOC(State Of Charge)。

假定 $\lambda_1=0.5$ 为电池的最佳状态,意味着此时电池具有足够的充放电能力。从风电场输出的短期优化控制的角度来看,要想使风电场平滑输出,电池应保持在最佳状态下运行,若偏离该状态,则电池需吸收或释放更多的电能使其回到最佳状态。

同样,一组超级电容的模型可近似看作一个理想电容器串联等效电阻。本文所指的超级电容是风电场内配置的所有超级电容的综合,且与各超级电容组的具体位置无关,各超级电容组都在场级控制器的协调下工作。

综合后的超级电容模型如式(2)所示:

$$\lambda_2 = \frac{E_2}{E_{2\max}} \quad (2)$$

其中, E_2 为超级电容的剩余电量; $E_{2\max}$ 为超级电容的额定容量; λ_2 为超级电容的荷电状态。

假定 $\lambda_2=0.5$ 为超级电容的最佳状态,意味着此时超级电容具有足够的充放电能力。从风电场输出的短期优化控制的角度来看,要想使风电场平滑输出,超级电容应保持在最佳状态下运行,若偏离该状态,则超级电容需吸收或释放更多的电能使其回到最佳状态。

1.2 风电接入的分层调度结构

储能系统的剩余调节容量一定程度上反映了风电场配合调度指令进行功率平滑的能力。其值越大,存储能力越强;反之,其值越小,存储能力越弱。当然,调节能力还与存储功率相关。本文采用混合储能系统,可以通过容量较小但是功率较大的超级

电容优化电池的运行状态。

相应的分层调度控制结构如图 1 所示,包括机组、风电场、电网 3 层。调度中心根据超短期风速预测值和储能系统荷电状态,更新风电场出力计划,每隔一段时间 T 向风电场发送一次实时调度指令。风电场的场级控制器接到调度指令后,分解出发电机及储能系统的出力,并进一步分解到具体的机组单元和储能单元。图中, P_{wind}^* 为风功率预测值, P_{ref} 为调度中心下发的风电场当前出力指令, SOC_{ref} 为储能系统荷电状态预测值, SOC 为储能系统荷电状态当前值, $P_1, P_2, \dots, P_n$ 为各储能单元当前的功率指令, $\text{SOC}_1, \text{SOC}_2, \dots, \text{SOC}_n$ 为各储能单元的当前荷电状态, $P_{*1}, P_{*2}, \dots, P_{*m}$ 为各风电机组当前的出力指令。

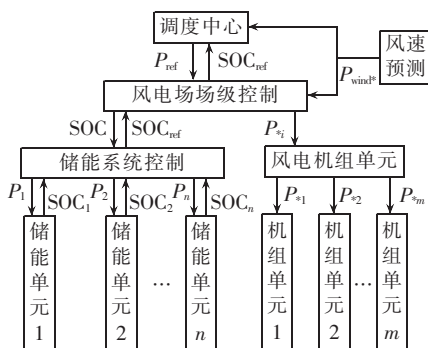


图 1 分层调度控制结构示意图

Fig.1 Structure of hierarchical dispatch control

2 储能系统模型

2.1 储能系统功率模型

假定风电机组都处于理想工况,忽略机组间的差异,全部机组等效输出,如式(3)所示:

$$P_{\text{wind}} = \sum_{i=1}^m P_{*i} \quad (3)$$

其中, P_{wind} 为等效后所有机组的输出功率。

同理,同类储能单元可等效为:

$$P_{\text{ESS}} = \sum_{j=1}^n P_j \quad (4)$$

其中, P_{ESS} 为等效后储能系统输出的功率。

2.2 储能系统荷电状态模型

储能系统的剩余容量与荷电状态之间的关系如式(5)所示:

$$\text{SOC} = \frac{E_r}{E_{\max}} \quad (5)$$

其中, E_r 为储能系统剩余容量; $E_{\max}$ 为储能系统额定容量。储能系统充满电能时的荷电状态为 1,放空时的荷电状态为 0。

本文将各储能单元视为一个储能系统,其荷电状态如式(6)所示,其中 SOC_j 为第 j 个单元的荷电状态。

$$\text{SOC} = \frac{\sum_{j=1}^n \text{SOC}_j}{n} \quad (6)$$

2.3 风电场并网功率模型

风电场并网功率等于风电机组输出功率与储能系统输出功率之差,如式(7)所示:

$$P_{\text{wind}} - P_{\text{ESS}} = P_g \quad (7)$$

若实际并网功率在一个调度周期内恒定,则:

$$P_g = P_{\text{ref}} \quad (8)$$

若实际并网功率允许较小波动,则:

$$P_{\text{ref}} - \delta \leq P_g \leq P_{\text{ref}} + \delta \quad (9)$$

其中, P_g 为经储能系统平衡后向电网输送的有功功率; δ 为偏离出力指标的裕量。

3 优化控制模型

基于上述分析,一个配置储能系统的风电场,在运行控制问题上的研究,主要侧重于调度中心在下达风电场出力计划后,风电场级控制器对其进行统一分配,得到风电机组系统和储能系统各自的出力指标,从而实现对该系统的统一调配,使风电场总体输出得到进一步平滑。因此,本文就风电场的运行控制策略,提出一种新的场级优化控制模型。

3.1 优化控制的模型

储能系统的荷电状态反映其调节能力,所以荷电状态可作为输出电能平滑度的间接衡量指标。即剩余可调节容量越大,荷电状态越大,实际的输出平滑性将越好,反之亦然。

本文针对配置一定容量储能系统的风电场运行控制问题,提出了一种新的短期优化控制动态模型,将储能系统对并网功率的最大综合调节能力作为优化控制目标,并需要满足风电实时调度的约束条件。

相应的优化目标函数如式(10)所示:

$$\min f = \sum_{i=1}^n [C_1(\lambda_1(i) - 0.5)^2 + C_2(\lambda_2(i) - 0.5)^2] \quad (10)$$

其中, f 为优化目标值, f 最小表示在未来 n 个控制周期混合储能的调节能力最强; C_1 、 C_2 分别为考虑功率损耗等因素下,动用蓄电池和超级电容调节容量的成本系数; $\lambda_1(i)$ 、 $\lambda_2(i)$ 分别为蓄电池和超级电容在第 i 周期的荷电状态。

满足风电实时调度的约束条件如下。

a. 风电场出力约束条件如式(11)或式(12)所示:

$$P_{\text{ref}}(i) - \delta \leq P_*(i) - P_1(i) - P_2(i) \leq P_{\text{ref}}(i) + \delta \quad (11)$$

$$P_*(i) - P_1(i) - P_2(i) = P_{\text{ref}}(i) \quad (12)$$

其中, $P_{\text{ref}}(i)$ 为调度中心下发第 i 周期内风电场出力指标; $P_*(i)$ 为预测风电场第 i 周期内的平均输出功率; $P_1(i)$ 、 $P_2(i)$ 分别为第 i 周期内蓄电池和超级电容的平均功率。采用单一蓄电池作为储能系统时, $P_2(i) = 0$; 采用单一超级电容作为储能系统时, $P_1(i) = 0$ 。

b. 容量约束条件:

$$0 \leq E_1(i) \leq E_{1\text{max}} \quad (13)$$

$$0 \leq E_2(i) \leq E_{2\text{max}} \quad (14)$$

其中, $E_1(i)$ 、 $E_2(i)$ 分别为第 i 周期内蓄电池和超级电容的当前容量; $E_{1\text{max}}$ 、 $E_{2\text{max}}$ 分别为蓄电池和超级电容的额定容量。

c. 功率约束条件:

$$0 \leq |P_1(i)| \leq P_{1\text{max}} \quad (15)$$

$$0 \leq |P_2(i)| \leq P_{2\text{max}} \quad (16)$$

其中, $P_{1\text{max}}$ 、 $P_{2\text{max}}$ 分别为蓄电池和超级电容一个控制周期内的最大平均功率。

3.2 求解方法

为实现上述优化控制目标,实际上需要求解一个多步的动态优化问题。对于该数学模型,很难采用解析法求解,因而基本上采用人工智能的方法。相应的人工智能方法很多,包括粒子群优化(PSO)算法、蚁群优化(ACO)算法、遗传算法(GA)等。相对而言,粒子群优化算法计算简单,收敛速度快,误差精度小,且不易陷入局部最优解^[18-19],因此根据本文所涉数学模型以及粒子群优化算法的优点,选用了粒子群优化算法,算法流程如图2所示。根据电力系统运行调度的特点,以 5 min 为控制周期 T ,优化过程考虑 3 个控制周期步长,即整个优化的时间窗口为 15 min。

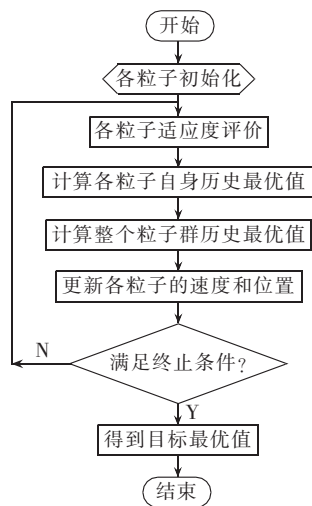


图2 基于粒子群优化的算法流程图

Fig.2 Flowchart of PSO-based algorithm

4 算例分析与仿真实验

4.1 风电场上报荷电状态和不上报荷电状态对比

4.1.1 采用单一储能的算例分析

a. 单一电池储能。

风电场配置单一的蓄电池储能时,风电场初始输出功率为 80 MW。蓄电池额定功率为 20 MW,额定容量为 23 MW·h,初始荷电状态为 0.5。蓄电池初始输出功率为 0,控制周期为 5 min,动态考虑未来 3 个周期的总体最优控制。此时,优化控制目标函数

式(10)中超级电容调节容量的成本系数 C_2 和超级电容在第 i 周期的荷电状态 $\lambda_2(i)$ 均置为 0。同时采用式(11)的不等式约束条件,使用 300 个粒子迭代 300 次。

1 h 内实际风电功率和并网功率如图 3 所示,电池的荷电状态如图 4 所示。可见,风电场选用单一蓄电池作为储能时,能够起到一定的并网功率平滑作用。但是蓄电池由于其自身的功率限制,在出力指令跟预测输出功率差距较大时,来不及输出足够的电能以满足要求,如图 5 所示,图中上、下 2 条虚线分别为蓄电池的功率上、下限,后同。

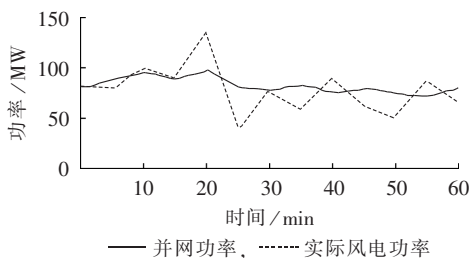


图 3 单一电池储能时实际风电功率与并网功率

Fig.3 Actual wind power and grid-connecting power when only battery is applied

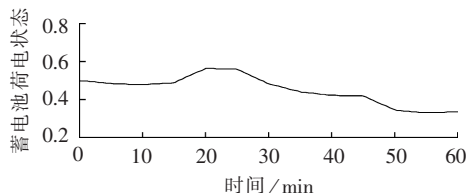


图 4 单一电池储能时电池的荷电状态

Fig.4 SOC of battery when only battery is applied

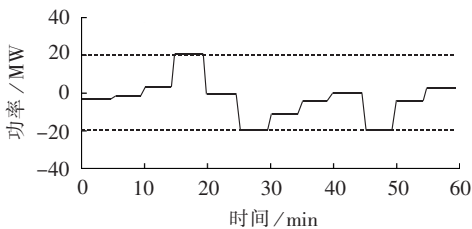


图 5 单一电池储能时蓄电池出力期望值

Fig.5 Expectation of battery output power when only battery is applied

b. 单一电容储能。

风电场配置单一的超级电容储能时,设风电场初始输出功率为 80 MW。超级电容额定功率为 48 MW,额定容量为 1 MW·h,初始荷电状态为 0.5。超级电容初始输出功率为 0。此时,优化控制目标函数式(10)中超级电容调节容量的成本系数 C_1 和超级电容在第 i 周期的荷电状态 $\lambda_1(i)$ 均置为 0。采用式(11)的不等式约束条件,使用 300 个粒子迭代求解 300 次。

1 h 内实际风电功率和并网功率如图 6 所示,超级电容的荷电状态如图 7 所示。

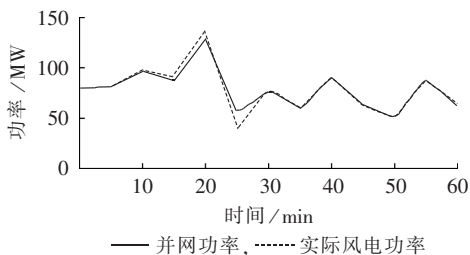


图 6 单一电容储能时实际风电功率与并网功率

Fig.6 Actual wind power and grid-connecting power when only super capacitor is applied

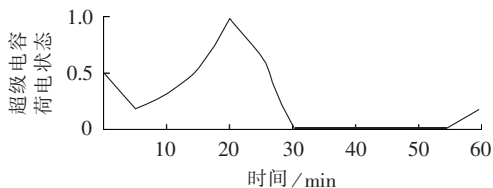


图 7 单一电容储能时电容的荷电状态

Fig.7 SOC of super capacitor when only super capacitor is applied

可见,风电场配置单一的超级电容储能时,超级电容由于自身的能量限制,能起到的功率平滑效果很不理想,甚至在 30~55 min 期间,完全没有起到储能系统应有的调节作用。因此,风电场配置单一超级电容很难满足平滑输出的要求。

4.1.2 采用混合储能的算例分析

风电场配置混合储能系统时,风电机组初始输出功率为 80 MW。蓄电池额定功率为 20 MW,额定容量为 23 MW·h,初始荷电状态为 0.5。超级电容额定功率为 48 MW,额定容量为 1 MW·h,初始荷电状态为 0.5。蓄电池和超级电容初始输出功率为 0。此时,优化控制目标函数式(10)计算过程中,采用式(11)的不等式约束条件,使用 300 个粒子迭代 300 次,其仿真结果如图 8—16 所示。

a. 情况 1: 风电场上报荷电状态。

风电场在上报荷电状态时,调度中心主要依据预测风速和混合储能系统的荷电状态整定下发出力指令,1 h 内实际风电功率和并网功率如图 8 所示,电池和电容的荷电状态如图 9 所示,电池的出力期望如图 10 所示。

比较图 3、6、8 可得:相比于单一蓄电池或超级电容储能,采用混合储能可以有效地平滑实际风电功率,使得风电在并网后并网功率的波动能够满足有关规定。

比较图 4、7、9 以及图 5、10 可得:相比于单一蓄电池或超级电容储能,配置相同容量的混合储能系统,结合蓄电池在能量密度和超级电容在功率密度

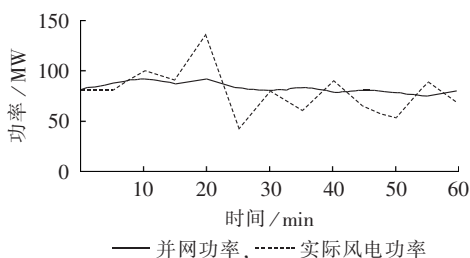


图 8 混合储能时实际风电功率与并网功率(情况 1)

Fig.8 Actual wind power and grid-connecting power when hybrid energy storage is applied(case 1)

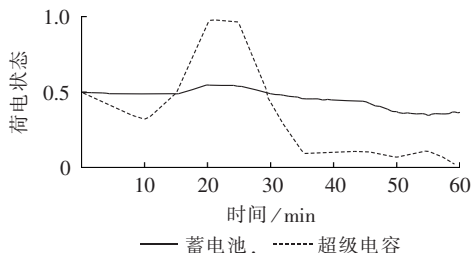


图 9 混合储能时电池与电容的荷电状态(情况 1)

Fig.9 SOC of battery and super capacitor when hybrid energy storage is applied(case 1)

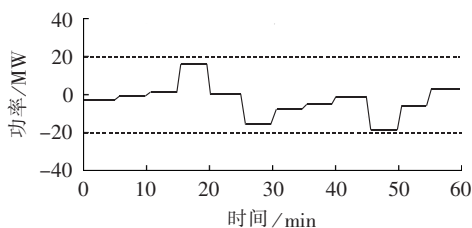


图 10 混合储能时电池的出力期望值(情况 1)

Fig.10 Expectation of battery output power when hybrid energy storage is applied(case 1)

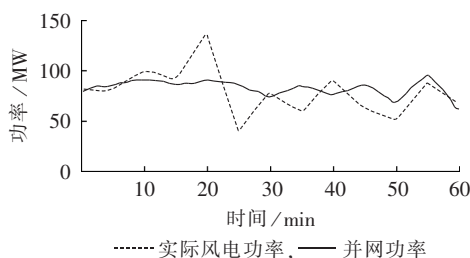


图 11 混合储能时实际风电功率与并网功率(情况 2)

Fig.11 Actual wind power and grid-connecting power when hybrid energy storage is applied(case 2)

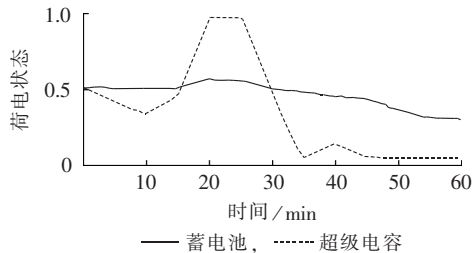


图 12 混合储能时电池和电容的荷电状态(情况 2)

Fig.12 SOC of battery and super capacitor when hybrid energy storage is applied(case 2)

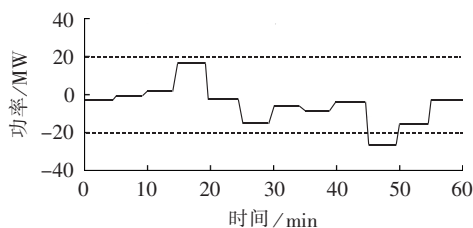


图 13 混合储能时电池的出力期望值(情况 2)

Fig.13 Expectation of battery output power when hybrid energy storage is applied(case 2)

上的优势,可以在相对大的出力指标和预测输出功率条件下,很好地平滑风电场出力指标。

b. 情况 2: 风电场不上报荷电状态。

风电场在未上报荷电状态时,调度中心仅依据预测风速整定下发出力指令,1 h 内实际风电功率和并网功率如图 11 所示,电池和电容的荷电状态如图 12 所示,电池的出力期望如图 13 所示。

比较图 9、12 以及图 10、13 可得:若不上报荷电状态,45~50 min 时电池的出力期望值越限,而 45~60 min 时超级电容没起到调节作用。

综上,相对于不上报荷电状态,配置一定容量混合储能的风电场若及时上报储能系统的荷电状态,调度中心制定的出力计划更为准确,风电场更容易实现风电功率的平滑输出。

4.2 配置混合储能的风电场恒定输出与平滑输出对比

针对上述配置混合储能的风电场,在优化控制目标函数式(10)计算过程中,采用式(12)的等式约

束条件,1 h 内实际风电功率和并网功率如图 14 所示,电池和电容的荷电状态如图 15 所示,电池的出力期望如图 16 所示。

比较图 9、15 以及图 10、16 可得:若风电场采用恒定输出,45~50 min 时蓄电池出力期望值趋近于输出功率临界值,而 50 min 时超级电容荷电状态趋近于 0,失去调节作用。因此,若风电场采用平滑输出,储能系统压力更小,相对调节能力更大。

混合储能恒定输出和平滑输出时各周期的充放电功率情况以及目标函数值 f ,如表 1 所示。分析可得如下结论。

a. 风电场恒定输出时蓄电池充放电功率大于平滑输出时充放电功率;而风电场恒定输出时超级电容的充放电功率略小于平滑输出时充放电功率。由于蓄电池的运行成本大于超级电容,所以风电场恒定输出的运行成本大于平滑输出。

b. 比较目标函数 f 大小可得:恒定输出大于平滑输出,即放宽约束条件后,储能系统调节能力更强。

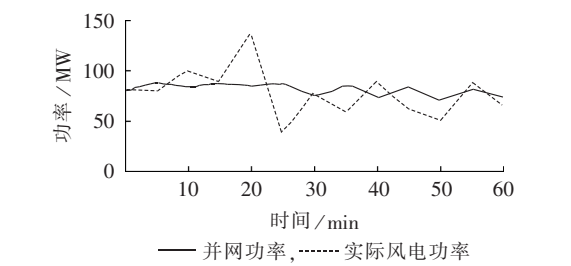


图 14 混合储能时实际风电功率与并网功率
Fig.14 Actual wind power and grid-connecting power when hybrid energy storage is applied

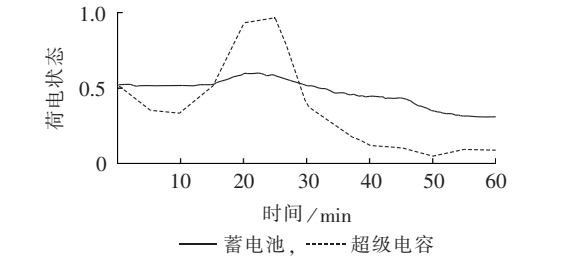


图 15 混合储能时电池与电容的荷电状态
Fig.15 SOC of battery and super capacitor when hybrid energy storage is applied

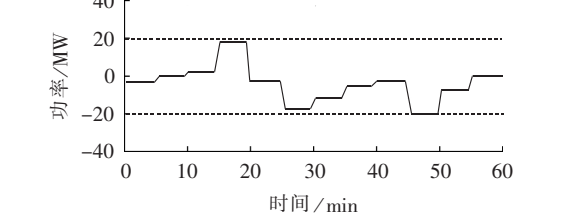


图 16 混合储能时电池的出力期望值
Fig.16 Expectation of battery output power when hybrid energy storage is applied

表 1 恒定输出和平滑输出时充放电状态
Table 1 Charging/discharging state for smooth mode and constant mode

时间/ min	平滑输出			恒定输出		
	电池功率/MW	电容功率/MW	目标函数值 f	电池功率/MW	电容功率/MW	目标函数值 f
5	2.643	1.353	0.1398	3.866	2.127	0.2403
10	1.085	0.915	0.5097	0.334	0.338	0.8165
15	0.918	2.183	0.5649	2.865	2.142	1.0784
20	15.911	6.093	1.6756	18.498	5.435	2.7944
25	1.113	0.371	1.3598	2.476	0.469	1.7791
30	15.549	6.446	3.4491	16.662	7.325	4.0358
35	7.972	4.128	4.8930	11.905	2.087	6.4869
40	5.007	0.013	6.0107	5.730	1.270	8.8020
45	1.085	0.098	10.3050	2.754	0.236	15.4701
50	20.473	0.532	19.6453	20.980	0.720	—
55	4.590	0.589	18.0026	6.565	0.561	27.3798
60	3.254	1.258	13.7322	0.111	0.104	23.5603
总计	79.500	23.993		92.746	22.814	

5 结论

针对配置储能系统的大型风电场,本文提出一种基于混合储能的风电场最优输出控制方法,建立了动态优化控制模型,确立了相应的控制目标和约

束条件,并设计了基于粒子群优化算法的求解算法。

通过具体的算例分析,验证了风电场配置混合储能既可避免单一储能技术的不足,又可在容量有限的情况下提高储能系统的性能。此外,结合电力系统短期实时调度,该方法能有效改善风电并网功率短期波动,提高电网对风电的消纳能力,为大型风电并网控制提供了有利条件。

本文所述的模型和解法是比较理想化的,如没有考虑蓄电池和超级电容的充放电损耗等,需要进一步开展深入研究。此外,在未来的实际工程应用中,还需采用一些工程化的改进措施,如根据风电预测值、储能状态、电网发电计划 3 个主要变量,预先制定相应的控制策略表。这样,虽然只是一种次优的控制,但是依然可以提高运行控制的可靠性。

参考文献:

[1] 金海峰,吴涛. 风电接入系统后的电压稳定问题[J]. 电力自动化设备,2010,30(9):82-84.
JIN Haifeng,WU Tao. Voltage stability after grid-connection of wind farm [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(9):82-84.

[2] 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,et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power [J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(25):1-9.

[3] 迟永宁,李群英,李琰,等. 大规模风电并网引起的电力统运行与稳定问题及对策[J]. 电力设备,2008,9(11):16-19.
CHI Yongning,LI Qunying,LI Yan,et al. Power system operation and stability problems caused by integration of large-scale wind power and corresponding solutions[J]. Power Equipment, 2008,9(11):16-19.

[4] 李建林,李蓓,惠东. 智能电网中的风光储关键技术[M]. 北京:机械工业出版社,2013:193-196.

[5] BRUNET Y. 储能技术[M]. 唐西胜,译. 北京:机械工业出版社, 2013:137-183.

[6] 于芑,周玮,孙辉,等. 用于风电功率平抑的混合储能系统及其控制系统设计[J]. 中国电机工程学报,2011,31(17):127-133.
YU Peng,ZHOU Wei,SUN Hui,et al. Hybrid energy storage system and control system design for wind power balancing[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(17):127-133.

[7] 张国驹,唐西胜,齐智平,等. 平抑间歇式电源功率波动的混合储能系统设计[J]. 电力系统自动化,2011,35(20):24-28,93.
ZHANG Guojun,TANG Xisheng,QI Zhiping,et al. Design of a hybrid energy storage system on leveling off fluctuating power outputs of intermittent sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011,35(20):24-28,93.

[8] 张坤,毛承雄,谢俊文,等. 风电场混合储能系统容量配置的优化设计[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):79-87.
ZHANG Kun,MAO Chengxiong,XIE Junwen,et al. Optimal design of hybrid energy storage system capacity for wind farm [J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(25):79-87.

[9] 韩涛,卢继平,乔梁,等. 大型并网风电场储能容量优化[J]. 电网

- 技术,2010,34(2):169-173.
- HAN Tao,LU Jiping,QIAO Liang,et al. Optimized scheme of energy-storage capacity for grid-connected large-scale wind farm[J]. Power System Technology,2010,34(2):169-173.
- [10] 南晓强,李群湛. 考虑风功率预测误差分布的储能功率与容量配置法[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):117-122.
- NAN Xiaoqiang,LI Qunzhan. Energy storage power and capacity allocation based on wind power forecasting error distribution[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):117-122.
- [11] YUAN Y,LI Q,WANG W,et al. Optimal operation strategy of energy storage unit in wind power integration based on stochastic programming[J]. Renewable Power Generation,IET,2011,5(2):194-201.
- [12] 张步涵,曾杰,毛承雄,等. 串并联型超级电容器储能系统在风力发电中的应用[J]. 电力自动化设备,2008,28(4):1-4.
- ZHANG Buhuan,ZENG Jie,MAO Chengxiong,et al. Application of series-parallel energy storage system with super-capacitor in wind power generation[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(4):1-4.
- [13] 沈阳武,彭晓涛,杨军,等. 超级电容器储能系统的功率实时控制[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):28-37.
- SHEN Yangwu,PENG Xiaotao,YANG Jun,et al. Real-time power control of ultracapacitor energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(11):28-37.
- [14] 姜欣,陈红坤,向铁元,等. 考虑调峰特性的电网风电接入能力分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(12):13-18,25.
- JIANG Xin,CHEN Hongkun,XIANG Tiejue,et al. Wind power penetration capacity considering peak regulation characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(12):13-18,25.
- [15] 刘巨,姚伟,文劲宇,等. 大规模风电参与系统频率调整的技术展望[J]. 电网技术,2014,38(3):638-646.
- LIU Ju,YAO Wei,WEN Jinyu,et al. Prospect of technology for large-scale wind farm participating into power grid frequency regulation[J]. Power System Technology,2014,38(3):638-646.
- [16] 韩民晓,崔军立,姚蜀军. 大量风电引入电网时的频率控制特性[J]. 电力系统自动化,2008,32(1):29-33.
- HAN Minxiao,CUI Junli,YAO Shujun. Frequency control characteristics for a power system with large amounts of wind power[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(1):29-33.
- [17] 孔飞飞,晁勤,袁铁江,等. 用于短期电网调度的风电场储能容量估算法[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):21-24.
- KONG Feifei,CHAO Qin,YUAN Tiejie,et al. Estimation of wind farm energy storage capacity for short-term power dispatch[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):21-24.
- [18] LI Wei,JOOS G. Comparison of energy storage system technologies and configurations in a wind farm[C]//Power Electronics Specialists Conference. Orlando,FL,USA:[s.n.],2007:1280-1285.
- [19] KENNEDY J,EBERHART R C. Particle swarm optimization [C]//Proc 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. Perth,Australia:[s.n.],1995:1942-1948.
- [20] 黄席樾,向长城,殷礼胜. 现代智能算法理论及应用[M]. 2版. 北京:科学出版社,2009:180-208.

作者简介:



陈 谦

陈 谦(1972—),男,江苏南京人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制、电力电子系统建模(E-mail: qchen@hhu.edu.cn);

陈霄逸(1989—),女,四川成都人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析与控制(E-mail: ellen426@163.com);

金宇清(1980—),男,江苏南京人,讲师,博士,主要研究方向为大规模风电场建模(E-mail: jyq16@hhu.edu.cn)。

Optimal control of large-scale wind farm based on hybrid energy storage

CHEN Qian,CHEN Xiaoyi,JIN Yuqing,NAI Lingchuan,ZHOU Jin

(College of Energy and Electrical Engineering,Hohai University,Nanjing 211100,China)

Abstract: The large-scale integration of fluctuated power sources makes the operation and dispatch of power system difficult and impacts its secure and stable operation. Therefore the energy storage device is applied to smooth the grid-connecting power. An optimal control method is proposed for the grid-connected large-scale wind farm equipped with the HESS(Hybrid Energy Storage System). With the battery and super capacitor as the energy storage media,a dynamic model of short-term optimal control is built and the corresponding control objectives and constraints are determined. An algorithm based on PSO(Particle Swarm Optimization) is designed to solve the model. The result of a simulation case verifies the correctness and effectiveness of the proposed method.

Key words: wind farms; energy storage; hybrid energy storage; super capacitor; electric batteries; optimization; control; grid-connection; models; dispatch