

基于储能与桨距角协调控制的风电功率波动平抑方法

范立新¹, 郭浩², 顾文¹, 蒋平³

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 国网无锡供电公司, 江苏 无锡 214000;

3. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 在风力发电系统中配置一定容量的储能系统,可以有效平抑风电功率波动。提出一种新的基于混合储能的风电功率平抑控制策略,采用滑动平均值算法获取风电输出期望功率,蓄电池和超级电容构成混合储能补偿系统。采用 Mamdani 型模糊控制器改变滤波器时间常数,实现可变滤波;考虑到滤波器的延迟效应,利用 Takagi-Sugeno 型模糊控制器调整蓄电池参考功率值,从而实现混合储能系统内部的协调控制,优化补偿功率分配。同时,提出基于储能系统荷电状态的风储协调控制机制,将风机桨距角的功率调节与储能功率平抑相结合,协同工作实现风电功率的良好平抑。仿真结果表明该协调控制策略具有良好的风电功率平抑效果。

关键词: 风电功率波动; 平抑; 储能; 模糊控制器; 荷电状态; 桨距角; 协调控制; 风电

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.09.015

0 引言

近年来,我国大力发展清洁的可再生能源,风机装机容量在电力系统中的比例不断上升。受气象条件、地理环境等一系列因素的影响,风电输出功率具有较强的波动性和间歇性,不利于风力发电大规模发展应用^[1-3]。在风电出口处配置一定容量和功率的储能系统,可以有效地平滑风电功率波动,保持电压、频率稳定,从而实现风力发电系统安全、经济、高效地运行^[4-6]。

为获得较好的功率平抑效果,需要制定合理的平抑目标和储能控制策略,同时也要兼顾储能系统的稳定与安全运行。文献[7-8]提出了利用一阶低通滤波器滤除风电随机功率中的高频波动分量,从而得到较为平滑的输出功率。文献[9]通过取仿真时间段内的风速信号的平均值为风速预测值,以此确定储能系统的有功功率参考值。文献[10]提出了一种基于离散小波变换的多类型储能系统容量配置算法,利用2级实时小波滤波平滑系统输出,在此基础上又提出了主动式能量反馈的控制策略,使储能的荷电状态 SOC(State Of Charge)始终保持在安全范围内。文献[11]提出一种利用混合储能平抑风电功率波动的控制方法,依据实时风电功率及储能荷电状态,从预置的专家信息库中检索控制算法,实现

风电功率在多种波动情况下的控制。文献[12-14]提出基于模糊控制的风电或风光联合发电功率的平滑控制策略,采用智能算法自适应调节平滑功率,优化储能系统平滑功率波动的控制策略。文献[15]提出一种基于实证数据和模糊控制的多时间尺度风储耦合实时滚动平抑波动方法,采用实时5点滚动法制定平抑目标,并利用储能分时跟踪平抑目标。

上述风电功率平抑方法均采用储能系统作为功率平抑手段,但在工程应用中,因为储能系统造价昂贵,容量有限的储能设备难免会出现满充或过放的情况。考虑到风机桨距角具有功率调节功能,本文首次将桨距角的功率调节引入风电功率平抑中,使其与储能系统协同工作,获得平滑的风电输出功率。

本文以基于混合储能系统的双馈风机发电系统为研究对象,其中混合储能系统由超级电容器和蓄电池组构成。通过对风机输出功率进行滑动平均值计算,获得平抑目标。利用模糊控制器进行可变滤波及蓄电池参考功率的直接调整,优化补偿功率分配。实时监控储能系统 SOC,当储能处于满充状态时,调节桨距角使输出功率维持在期望值水平。所提协调控制策略能够在保证风储系统安全运行的条件下,获得较好的风电功率平抑效果,在 Simulink 中搭建的仿真模型验证了所述方法的有效性。

1 风电期望功率计算

为获得较好的功率平抑效果,使风电输出功率达到良好的期望值,首先需要制定合理的功率平抑目标。本文采用滑动平均值算法对风机输出的原始功率进行处理,再经过功率变化率限制环节,可获得平滑度较好的风电期望功率。

收稿日期:2015-08-04;修回日期:2016-04-05

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011-AA05A105);国家电网公司重点科技项目

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA-05A105) and the Science and Technology Research Program of SGCC

设系统采样间隔为 Δt , 初始时刻定为 t_1 , 当前时刻为 $t_i=(i-1)\Delta t$, 采集风机实时输出功率 $P_w(t_i)$, 则风电输出平滑功率值为:

$$P_h(t_i)=\begin{cases} \sum_{j=1}^i P_w(t_j)/i & 1\leq i<N \\ \sum_{j=i-N+1}^i P_w(t_j)/N & i\geq N \end{cases} \quad (1)$$

其中, $P_h(t_i)$ 为 t_i 时刻计算得到的风电输出功率期望值; N 为滑动平均值算法所取步长。

风速的随机变化性较大, 仅对 $P_w(t_i)$ 进行滑动平均值处理得到的平滑功率可能还存在较大波动, 因而可以对平滑功率作变化率限制处理, 从而得到最终的风电期望功率 P_{desire} , 即令:

$$\left| \frac{P_h(t_{i+1})-P_h(t_i)}{P_h(t_i)} \right| \leq m \quad (2)$$

其中, $P_h(t_{i+1})$ 、 $P_h(t_i)$ 为相邻时刻的平滑功率值; m 为变化率幅值。令:

$$n=(N-1)\Delta t \quad (3)$$

其中, n 为所取滑动平均值时间尺度。由式(1)可知, 任时刻的平滑功率值 $P_h(t_i)$ 是对原输出功率曲线取 n 时间段内的滑动平均值, 得到的期望功率不仅平滑度较好, 且与原输出功率曲线有很好的等值性。

2 混合储能系统的协调控制方法

2.1 基于可变滤波算法的协调控制设计

无 SOC 反馈控制的储能控制策略无法有效控制与调节储能系统的充放电, 这不利于长期合理使用储能系统, 也容易引发储能装置使用过程中的安全问题^[16]。蓄电池 SOC 反馈控制就是根据蓄电池 SOC 及补偿功率参考值调整低通滤波器的时间常数, 但低通滤波器有延迟效应, 在调节滤波器时间常数后并不能立即反映到蓄电池补偿功率的改变, 因此本文提出第 2 层蓄电池保护机制, 即在可变滤波算法的外层增加蓄电池功率直接调整部分。当蓄电池 SOC 达到警戒线, 虽然此时已经进行滤波器时间常数的调整, 但因惯性作用, 仍然有可能使蓄电池 SOC 超出警戒值, 此时可以利用第 2 层保护机制直接修改补偿功率值, 补偿功率参考值为:

$$P_{\text{bessref}}=P_{\text{bessini}}\alpha \quad (4)$$

$$P_{\text{essref}}=P_{\text{bu}}-P_{\text{bessref}}=P_w-P_{\text{desire}}-P_{\text{bessref}} \quad (5)$$

其中, α 为蓄电池功率调整系数; P_{bessini} 为未调整的蓄电池参考功率; P_{bessref} 、 P_{essref} 分别为蓄电池和超级电容器的补偿功率参考值; P_{bu} 为混合储能系统的整体补偿功率; P_w 为风机输出功率。

本文使用模糊控制器实现可变滤波算法和蓄电池补偿功率的调整, 具体控制框图如图 1 所示, 其中使用 Mamdani 型模糊控制器 A 改变滤波器时间常数 T , 实现可变滤波; 利用 Takagi-Sugeno 型模糊控

制器 B 调整蓄电池补偿功率参考值。

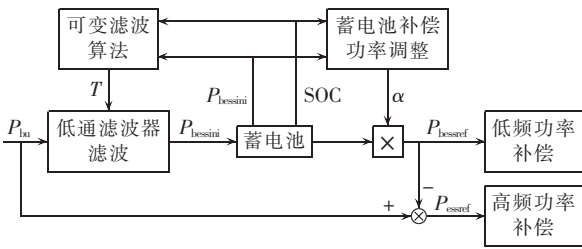


图 1 可变滤波控制框图

Fig.1 Block diagram of variable filter control

2.2 模糊控制器设计

模糊控制器 A 控制目标为, 当蓄电池的 SOC 偏离正常工作范围时, 根据此时所需补偿功率 P_{bessini} 及此时 SOC 值对低通滤波器时间常数进行调整, 从而改变下一时刻的补偿功率值, 进一步改变蓄电池 SOC。根据控制目标设计了模糊控制 A 输入、输出的模糊隶属函数^[17-18], 如图 2 所示。

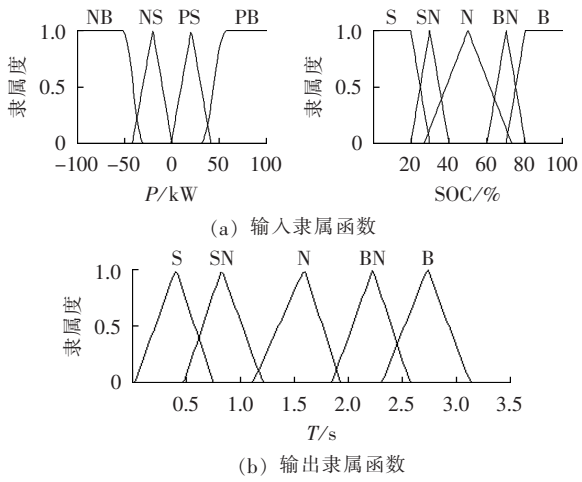


图 2 模糊控制器 A 隶属函数

Fig.2 Membership functions of fuzzy controller A

具体的控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制器 A 规则表
Table 1 Rules of fuzzy controller A

SOC 隶属度	输出 T 的模糊隶属度			
	P_{bessini} 隶属度为 NB	P_{bessini} 隶属度为 NS	P_{bessini} 隶属度为 PS	P_{bessini} 隶属度为 PB
S	B	B	S	S
SN	B	BN	SN	SN
N	N	N	N	N
BN	SN	SN	BN	B
B	S	S	B	B

模糊控制器 B 控制目标为, 当蓄电池 SOC 达到警戒工作区域时, 在改变滤波器时间常数的同时进行蓄电池补偿功率直接调整。模糊控制器 B 输入隶属函数如图 3 所示, 其中 P_{bessini} 的输入隶属函数与模糊控制器 A 相同, SOC 的隶属函数则不同, 仅当 SOC 将要达到或已经达到非正常工作区域时, 才需要启动

模糊控制器 B,所以设计的 SOC 隶属函数需要对临界工作区域十分敏感。

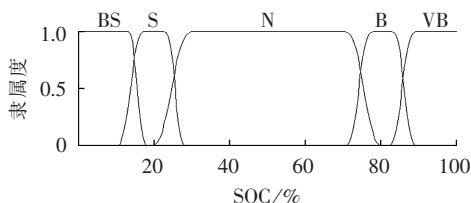


图 3 输入隶属函数

Fig.3 Input membership function

表 2 为输出隶属函数,表 3 为模糊控制器 B 的控制规则表。

表 2 模糊控制器 B 输出隶属函数

Table 2 Output membership function of fuzzy controller B

α	模糊隶属度	α	模糊隶属度
Z	0	PM	0.5
PS	0.1	PB	1.0

表 3 模糊控制器 B 规则表

Table 3 Rules of fuzzy controller B

SOC 隶属度	输出 α 的模糊隶属度			
	P_{bessini} 隶属度为 NB	P_{bessini} 隶属度为 NS	P_{bessini} 隶属度为 PS	P_{bessini} 隶属度为 PB
BS	Z	Z	PB	PB
S	PS	PM	PB	PB
N	PB	PB	PB	PB
B	PB	PB	PM	PS
VB	PB	PB	Z	Z

3 储能与风力发电系统间的协调控制策略

3.1 协调控制机理分析

通常选用的储能系统总体储能容量或者功率补偿能力是有限的,而且在经济最优的前提下,难免会出现储能容量总体不足的情况。因此,提出一种风力发电系统与储能装置协调控制的策略,主要考虑在某些极端情况下,混合储能系统进行风电功率平抑时,储能系统容量不足而将要出现满充现象,此时可以启动风机桨距角控制,调节风机接收的风能,优先满足风电输出功率平滑稳定的要求。该控制策略更适用于分布式发电或规模较小的风力发电场,平滑稳定的功率输出是其主要要求。

在储能系统平抑风电功率波动时,蓄电池作为低频功率补偿部分,充放电频率较低,超级电容器补偿高频功率,正常工作时处于频繁充放电的状态,所以超级电容器不易发生过充或者过放的情况。而只有在储能系统内部协调控制发挥作用,为了保护蓄电池将更多的补偿功率分配给超级电容器时,才会使其发生过充或过放的情况。工程实际应用时超级电容器应满足下列约束条件:

$$U_{\min} \leq U_{\text{ess}} \leq U_{\max} \tag{6}$$

$$i_{C,\text{pk}} = \frac{0.5C U_{\text{ess}}}{CR_C + 1} \tag{7}$$

$$P_{\text{ess,max}} = \pm CU_{\text{ess}} \left| \frac{dU_{\text{ess}}}{dt} \right|_{\max} \tag{8}$$

其中, $i_{C,\text{pk}}$ 为超级电容器峰值电流; C 为超级电容器的电容值; R_C 为超级电容器的等效电阻值; $P_{\text{ess,max}}$ 为超级电容器最大充放电功率; U_{ess} 为超级电容器工作电压; $U_{\text{max}}, U_{\text{min}}$ 分别为超级电容器工作电压的上限和下限; $|dU_{\text{ess}}/dt|_{\max}$ 为超级电容器电压最大变化率。在忽略内部电阻影响时,超级电容器的电能容量近似表示为:

$$E = \frac{1}{2} C U_{\text{ess}}^2 \tag{9}$$

U_{ess} 可以近似反映出超级电容器的能量剩余情况,因此可以将 U_{ess} 作为整个储能系统工作状态的判断依据,而当检测到 U_{ess} 处于异常情况时,则需要根据具体情况进行风电系统与储能的协调控制。具体判据规则如下:

- a. 若 $U_{\text{ess}} \geq U_{\text{max}}$ 且 $P_{\text{bu}} > 0$ (储能充电),则储能系统已处于过充状态,亦表明此时风机原动机功率过大,仍需向储能系统存储能量,为了保证储能系统安全,需要风储协调控制器发出切除储能系统信号,同时启动风机桨距角调控系统,主动弃风降低风电功率;
- b. 若 $U_{\text{ess}} \leq U_{\text{min}}$ 且 $P_{\text{bu}} < 0$ (储能放电),则储能系统已处于过放状态,需要风储协调控制器发出切除储能系统信号,同时保持风机桨距角 $\beta = 0^\circ$,以最大功率点跟踪 (MPPT) 状态运行;
- c. 其他情况则进入储能平抑功率波动工况。

3.2 桨距角控制

协调控制中风机桨距角调控系统框图如图 4 所示,在 PI 调节器、限幅环节、 β 变化率限制环节的作用下,使风机功率 P_w 跟随参考功率 P_{desire} 变化。

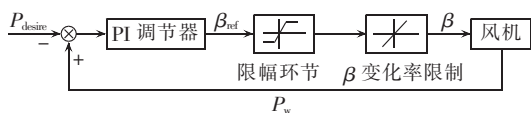


图 4 桨距角的控制框图

Fig.4 Block diagram of pitch angle control

在需要启动桨距角调节系统时,说明此时要调小 β 值,风能利用系数 C_p 不再需要处于最大值 $C_{p,\text{max}}$ 的状态,从而让风机功率 P_w 跟随由滑动平均值计算得出的风电输出期望功率 P_{desire} 变化。但当需要储能释放能量时,要退出桨距角调控,使 β 恢复为 0,重新让风力发电机工作于 MPPT 水平。为了判断何时恢复,引入虚拟功率 P_{virtual} :

$$P_{\text{virtual}} = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{R}{\lambda_{\text{opt}}} \right)^3 C_{p,\text{max}} \left(\frac{\omega_m}{N_c} \right)^3 \tag{10}$$

其中, P_{virtual} 即为假设 $\beta = 0$ 时所计算得出的虚拟最大

功率; ρ 为空气密度; A 为扫风面积; R 为风机叶片半径; λ_{opt} 为最佳叶尖速比; C_{pmax} 为最大风能利用系数; ω_m 为风机转子机械速度; N_c 为齿轮箱变速比。令:

$$\Delta P = P_{virtual} - P_{desire} \tag{11}$$

据此可以判断何时重新进入储能平抑工作状态,也即恢复 $\beta=0$ 时的风电最大功率输出状态。具体判断如下:

- a. 若 $U_{ess} \geq U_{max}$ 且 $\Delta P < 0$, 则退出桨距角调控, 逐渐恢复 $\beta=0$ 时 MPPT 工况, 同时发出启动储能系统控制信号, 进入储能平抑功率波动工况;
- b. 若 $U_{ess} \leq U_{min}$ 且 $\Delta P > 0$, 则发出启动储能系统控制信号, 进入储能平抑功率波动工况;
- c. 其他情况维持桨距角调控工况不变。

目前风电机组的变桨方式可分为液压变桨和电动变桨 2 种。液压变桨距系统是以液体压力驱动执行机构, 电动变桨系统是以伺服电机驱动齿轮实现变距调节功能。桨距角调控的响应时间及调节速度对风电功率输出的影响较大, 继而影响整体功率平抑效果, 桨距角的变化速度一般不超过 $15^\circ/s$, 仿真中对桨距角的调节也根据工程实际进行相应的模拟。

根据上文所述总结控制目标函数及各约束条件为:

$$\begin{cases} P_{output} = P_{desire} = P_w + P_{essref} + P_{bessref} & \beta = 0 \\ P_{output} = P_w = P_{desire} & \beta \neq 0 \end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{cases} SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \\ U_{min} \leq U_{ess} \leq U_{max} \end{cases} \tag{13}$$

其中, P_{output} 为风机最终输出功率。

风储系统整体的控制流程图见图 5。

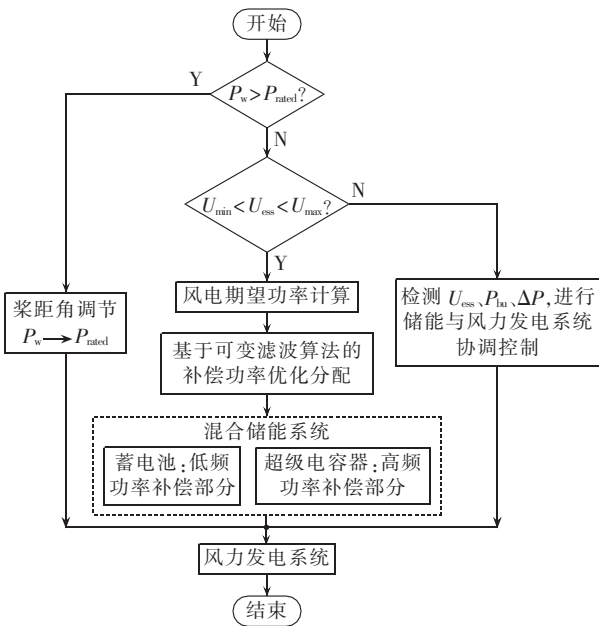


图 5 风储联合系统整体控制流程图

Fig.5 Flowchart of wind-storage system control

4 仿真分析

4.1 仿真参数

本文在 MATLAB/Simulink 中搭建了双馈风力发电机模型及混合储能系统模型, 利用单机模拟风电场情况, 采用基本风、阵风、渐变风和随机风叠加的风速模型。风力发电机组采用 GE 额定功率为 1.5 MW 的 DFIG, 设定风机转动惯量 $J=200 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 从而可以观察到风机输出功率在较短的仿真时间内发生较明显的波动。滑动平均值计算过程中, 取移动时间尺度 $n=2 \text{ s}$, 功率变化率幅值 $m=10\%$ 。

仿真算例中蓄电池容量定为 300 kJ; SOC 在算例 1、2 中分别为 60% 和 82%, SOC 正常值为 15%~85%。超级电容器容量分别为 15 F 和 8 F; 补偿功率上限为 0.2 MW, 补偿周期为 0.004 s; 最大电压值为 780 V。桨距角调节器的响应时间为 0.1 s, 调节速度限制为 $10^\circ/s$ 。

4.2 仿真算例分析

4.2.1 仿真算例 1

图 6 对比了滤波时间常数 $T=2 \text{ s}$ 时与可变滤波控制时储能平抑功率波动的情况, 由功率补偿过程中蓄电池 SOC 的变化曲线来反映, 在仿真进行至第 8 s 时, 定时间常数控制中 SOC 已低于 15%, 处于非正常工作状态。而采用可变滤波控制后, 蓄电池 SOC 变化更具弹性, 在蓄电池 SOC 处于较高位时, 如 2 s 左右, SOC 变化率增大; 6 s 后处于低位时, SOC 变化率减小, 阻止其进一步恶化。

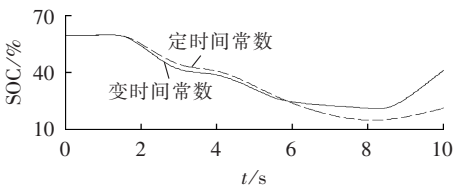


图 6 蓄电池 SOC
Fig.6 SOC of battery

图 7 为混合储能装置加入前后风电输出功率的对比图, 可以明显看出所提储能系统平抑风电功率波动的控制策略效果明显, 补偿后功率输出较为平滑, 波动幅度大幅减小。

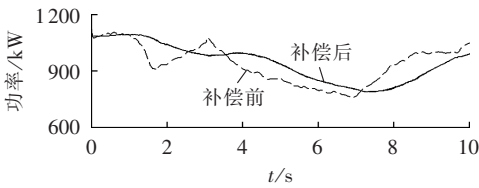


图 7 混合储能加入前后的风电输出功率

Fig.7 Curve of wind power output with and without hybrid energy storage system

4.2.2 仿真算例 2

模拟储能满充情况, 验证储能与风机桨距角协调

控制策略的有效性。将蓄电池 SOC 设定为 82%, 以期在较短仿真时间内储能系统达到满充状态。当蓄电池 SOC 逐渐达到安全极值 85%, 在储能系统内部协调控制机制的作用下, 此时超级电容器的补偿功率迅速增加并在 6.2 s 时 U_{ess} 达到最大值, 如图 8 所示。这也意味着整个混合储能系统在 6.2 s 时达到了满充状态, 将不能继续存储多余的风电能量。为了让风电功率继续跟踪期望值输出, 所设计的风机桨距角与储能系统协调控制机制将发挥作用, 此时储能系统不再参与功率平抑, 取而代之的是桨距角的调节。

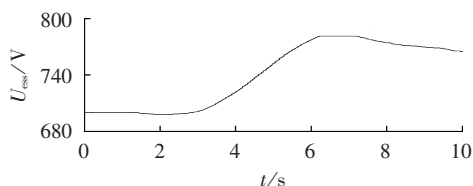


图 8 超级电容器工作电压
Fig.8 U_{ess} of supercapacitor

图 9 反映了风机桨距角的变化情况, 可以看到在 6.2 s 切除储能系统的同时, 桨距角调控开始, 桨距角不再为 0。此过程中桨距角的调节幅度较小, 因此调节器的响应时间及桨距角调整时间较短, 对整体风电功率的影响也较小。

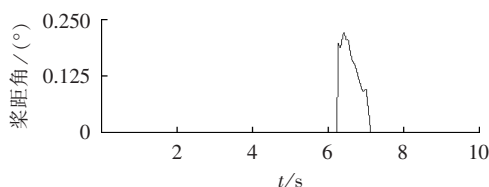


图 9 风机桨距角
Fig.9 Curve of pitch angle

图 10 为储能系统补偿前后风电输出功率的对比图, 可以看出桨距角调控期间的功率平滑效果较好。但在 7.2 s 时, $P_w < P_{\text{desire}}$, 即补偿功率 P_{bu} 为负, 需要储能装置释放能量, 此时储能系统重新接入风电系统, 平抑功率波动。根据图 8 可知, 蓄电池和超级电容器重新进入放电状态, 桨距角也变为 0° (如图 9 所示), 风机再次进入最大风能追踪状态。

图 10 中在 6.2 s 时切除储能系统, 启动桨距角

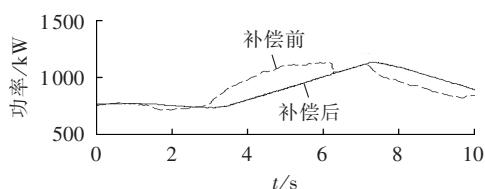


图 10 储能系统补偿前后的风电输出功率
Fig.10 Curve of wind power output with and without compensation by energy storage system

调控系统, 让风电输出功率跟随指令功率 P_{desire} 变化。6.2 s 与 7.2 s 时间点上进行了风力发电系统与储能系统的协调切换控制, 图中未见较明显的功率起伏波动, 说明控制策略的实施平稳迅速。

5 结论

本文采用滑动平均值算法确定风电平抑期望功率, 提出一种基于蓄电池 SOC 的可变滤波控制策略, 采用 2 个不同类型的模糊控制器完成可变滤波算法及蓄电池补偿功率的调整。在储能系统内部协调控制的基础上, 提出一种储能系统与风电系统的协调控制方法, 具体是在储能系统满充时启用风机桨距角调节风电输出功率, 将桨距角的功率调节功能与储能功率平抑功能相结合, 降低风电功率波动。

仿真算例结果表明所提协调控制策略使蓄电池 SOC 变化更加具有弹性, 实现了补偿功率在储能系统内部的优化分配; 同时在储能过充时风储协调控制器可以立即响应, 启动桨距角调控系统, 减少风能接收, 当需要储能放电、恢复平抑功率工作状态时, 也能达到理想的控制要求。

参考文献:

- [1] 田春笋, 李琼林, 宋晓凯. 风电场建模及其对接入电网稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 46-50.
TIAN Chunzheng, LI Qionglin, SONG Xiaokai. Modeling and analysis of the stability for the power system considering the integration of the wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 46-50.
- [2] 牛林华, 龚庆武, 黄炳翔, 等. 大规模风电接入下的风光火电力系统联合优化调度[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 52-58.
NIU Linhua, GONG Qingwu, HUANG Bingxiang, et al. Optimal dispatch of wind-gas-coal power generation system with large-scale wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 52-58.
- [3] 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.
JIANG Xin, CHEN Hongkun, XIANG Tiejuan, et al. Wind power penetration capacity considering peak regulation characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12): 13-18.
- [4] USHIWATA K, SHISHIDO S, TAKAHASHI R, et al. Smoothing control of wind generator output fluctuation by using electric double layer capacitor[C]//International Conference on Electrical Machines and Systems. Seoul, Korea: IEEE, 2007: 308-313.
- [5] BARTON J P, INFELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(2): 441-448.
- [6] 陈谦, 陈霄逸, 金宇清, 等. 基于混合储能的大型风电场优化控制[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 70-73.
CHEN Qian, CHEN Xiaoyi, JIN Yuqing, et al. Optimal control of large-scale wind farm based on hybrid energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 70-73.
- [7] PAATERO J V, LUND P D. Effect of energy storage on varia-

- tions in wind power[J]. Wind Energy,2005,8(4):421-441.
- [8] 李霄,胡长生,刘昌金,等. 基于超级电容储能的风电场功率调节系统建模与控制[J]. 电力系统自动化,2009,33(9):86-90.
LI Xiao,HU Changsheng,LIU Changjin,et al. Modeling and controlling of SCES based wind farm power regulation system[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(9):86-90.
- [9] 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 Buhan,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.
- [10] HAN Xiaojuan,CHEN Fang,CUI Xiwang,et al. A power smoothing control strategy and optimized allocation of battery capacity based on hybrid storage energy technology[J]. Energies Journal,2012,5(15):1593-1612.
- [11] 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.
- [12] LI X. Fuzzy adaptive Kalman filter for wind power output smoothing with battery energy storage system[J]. IET Renewable Power Generation,2012,6(5):340-347.
- [13] LI X J,LI Y,HAN X J,et al. Application of fuzzy wavelet transform to smooth wind/PV hybrid power system output with battery energy system[J]. Energy Procedia,2011,12(39):994-1001.
- [14] LI X J,HUI D,WU L,et al. Control strategy of battery state of charge for wind/battery hybrid power system[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2010). Bari,Italy:IEEE,2010:2723-2726.
- [15] 刘春燕,晁勤,魏丽丽. 基于实证数据和模糊控制的多时间尺度风储耦合实时滚动平抑波动[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):35-39.
- LIU Chunyan,CHAO Qin,WEI Lili. Wind-storage coupling based on actual data and fuzzy control in multiple time scales for real-time rolling smoothing of fluctuation[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):35-39.
- [16] 丁明,吴建锋,朱承治,等. 具备荷电状态调节功能的储能系统实时平滑控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(1):22-29.
DING Ming,WU Jianfeng,ZHU Chengzhi,et al. A real-time smoothing control strategy with SOC adjustment function of storage systems[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(1):22-29.
- [17] 张坤,吴建东,毛承熊. 基于模糊算法的风电储能系统的优化控制[J]. 电工技术学报,2012,27(10):41-43.
ZHANG Kun,WU Jiandong,MAO Chengxiong. Optimal control of energy storage system for wind power generation based on fuzzy algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(10):41-43.
- [18] BOUAFIA A,KRIM F. Design and implementation of high performance direct power control of three-phase PWM rectifier, via fuzzy and PI controller for output voltage regulation[J]. Energy Conversion and Management,2009,50(1):6-13.

作者简介:



范立新

范立新(1966—),男,安徽巢湖人,高级工程师,硕士,从事继电保护和新能源研究工作;

郭浩(1989—),男,山东枣庄人,硕士,从事电力系统运行控制方面的研究(E-mail: hanzhao110@163.com);

顾文(1969—),男,江苏南京人,高级工程师,硕士,从事电厂及新能源技术监督

和试验研究;

蒋平(1954—),男,江苏溧阳人,教授,博士研究生导师,博士,从事电力系统运行控制和电力电子在电力系统中的应用研究(E-mail: jping@seu.edu.cn)。

Wind power fluctuation suppression based on control coordination between energy storage and pitch angle

FAN Lixin¹, GUO Hao², GU Wen¹, JIANG Ping³

(1. Jiangsu Frontier Electric Technologies Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. State Grid Wuxi Power Supply Corporation, Wuxi 214000, China;

3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: An energy storage system with a certain capacity configured in the wind power system can efficiently suppress the power output fluctuation. A control strategy based on the hybrid energy storage system consisting of battery and super-capacitor is proposed to suppress the wind power fluctuation. The moving average algorithm is applied to obtain the expected wind power output, the Mamdani fuzzy controller is applied to change the time constant of low-pass filter for variable filtering and the Takagi-Sugeno fuzzy controller is applied to adjust the battery power reference for considering the delay effect of filter, which realizes the internal coordinative control of energy storage system and the optimal allocation of compensating power. The coordination between the pitch angle control for wind turbine power regulation and the SOC (State Of Charge) control for energy storage system is proposed to suppress the wind power fluctuation. Simulative results show the better performance of the proposed coordinative control.

Key words: wind power fluctuation; suppression; energy storage; fuzzy controller; state of charge; pitch angle; coordinative control; wind power