

# 基于超级电容储能的直流风电机组协调控制

常 超, 史 阳

(特变电工新疆新能源股份有限公司, 陕西西安 710119)

## Coordinated Control of DC Wind Power Generator Based on Super Capacitor Energy Storage

CHANG Chao, SHI Yang

(TBEA Xinjiang Sunoasis Co., Ltd., Xi'an 710119, China)

**摘 要:** 采用直流汇集方式的风电场将为未来大规模新能源发电汇集提供新途径。由于风力发电系统输出功率的波动会对电网的稳定运行造成负面影响, 因此本文提出了一种含有储能系统的直流并联型风电场功率协调控制方案。该控制方案综合考虑电网需求、风机风况以及风机储能系统的储能状态, 向各直流风机发送功率指令, 通过调节各发电机和风机储能系统的输出功率, 使得风电场输出的有功功率可在一定范围满足电网的需求, 大大降低了风场功率波动对电网的影响。其中, 在满足仿真精度的前提下, 对直流风机中的整流器和隔离型全桥 DC/DC 变换器以及超级电容储能系统进行了适当简化。采用 PSCAD/EMTDC 进行仿真, 仿真结果较好地满足了控制目标的要求, 验证了提出的控制策略的有效性。

**关键词:** 永磁同步发电机; 储能系统; 协调控制策略; 风电场; 风电功率波动

**Abstract:** The wind farm by using the direct current collection method will provide a new way for the future large-scale renewable energy power generation. Due to the fluctuation of the output power of wind power generation system will have a negative impact on the operation stability of power grid, and a power coordinated control scheme of DC parallel wind farm with energy storage system is proposed in this paper. By comprehensively considering grid demand, wind turbine state and energy storage state of energy storage system, power instructions of the DC wind turbines can be sent from control center. Through adjusting output power of the generators and the wind turbine energy storage system, the active power output of wind farms can meet the requirements of power grid in a certain range, which greatly reduces the influence of wind power fluctuation on power grid. Under the premise of meeting the simulation accuracy, the rectifier and the isolated full bridge DC/DC converter of the DC wind turbine and the super capacitor energy storage

system are simplified properly. The simulation results of PSCAD/EMTDC are used to meet the requirements of the control target, and the effectiveness of the proposed control strategy is verified.

**Keywords:** PMSG; energy storage system; coordinated control strategy; wind farm; wind power fluctuation

## 0 引 言

中国风电装机容量快速增长, 在“建设大基地, 融入大电网”的发展战略指导下, 风电场呈现出规模化发展的趋势, 单一风电场装机容量由几万千瓦增长到几十万, 甚至上百万千瓦<sup>[1]</sup>。

目前, 中国西北、华北、东北等地区建成的或在建的风电基地一般都采用交流集电、交流外送的方式完成风电基地的电力外送和消纳。这些方式都存在电压稳定性不高、配套无功支撑量大、继电保护非常复杂、新能源利用效率低下以及存在连锁故障的风险大和谐波污染严重等问题, 尤其是在风电基地规模不断扩大的情况下, 上述问题尤为突出。而直流汇集系统由于可以有效地解决交流汇集系统面临的无功、保护等问题, 被认为是一种很具潜力的大型风电基地汇集方式。

此外, 在大规模风电集中并网的电力系统中, 风力发电不同于常规发电的静态出力特性和动态响应特性, 给电力系统供电的充裕性及运行的安全稳定性带来新的挑战。各种储能装置由于具有对功率和能量的时间迁移能力, 是改善常规发电静态出力特性及风力发电动态响应特性的有效手段。

因此, 含有储能的直流风电场可为未来大规模风能的开发和利用提供一种新的选择。

文献 [2] 经过对交流风电场和直流风电场的损耗以及能量的生产成本等进行比较后指出, 在采用远距离大容量风电场进行生产和传输时, 采用 HVDC 传输的直流风电场在成本、损耗和维护费用上要优于交流风电场。文献 [3-5] 对储能系统应用于风电/光伏系统进行了分析, 研究表明储能系统可有效调节风电/光伏系统的出力, 降低由于新能源的功率波动给电网造成的影响。文献 [6] 对目前应用在风力发电中的储能的类型进行了较为全面的介绍和比较, 指出超级电容储能可有效平抑风电功率在短时间尺度上的波动。文献 [7-8] 对风电场的功率调度进行了相关研究, 根据风电场中各个风机的风况以及电网调度指令的要求对风电场内各个风机进行功率分配, 可在一定程度上调节风电场的出力。

综合以上对国内外研究现状的分析可知, 目前针对风电场的功率协调控制研究主要集中在交流风电场, 针对直流风电场的研究较少。本文建立了一种用于基于含有储能的永磁直驱风机的直流并联型风电场的功率分配策略。首先, 介绍了直流风机的结构, 并根据研究的需求对其进行了适当简化。其次, 描述了单个直流风机的控制技术, 再次, 介绍了本协调控制策略在直流并联型风电场中的工作原理, 最后, 建立仿真算例验证了控制策略的有效性。

## 1 直流风机的结构及其简化

### 1.1 直流风机的配置

图 1 显示了含有超级电容储能系统的直流风机的结构。该风机组由风力机、永磁同步发电机、三相全桥整流器、隔离型 DC/DC 变换器以及并联于风机直流母线的储能系统构成。三相全桥整流器称为机侧整流器(GSR), 其开关器件由 IGBT 和二极管反并联组成, 主要用于 AC/DC 变换以及发电机输出功率的控制。隔离型 DC/DC 变换器由全桥逆变器、交流变压器以及二极管整流器组成, 主要用于风机直流母线进行升压变换。储能系统则由超级电容储能单元和双向 DC/DC 变换器级联而成, 主要用于调节风电机组输出的有功功率, 使直流风机出力满足风场功率指令的要求。

### 1.2 直流风机的简化模型

由于本文是在稳态下对直流风机进行功率调

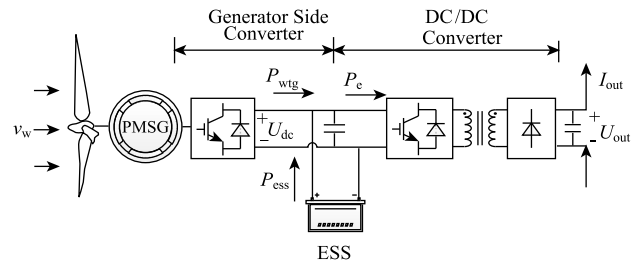


图 1 直流风机示意图

节, 在交-直变换、直流升压以及储能系统的充放电中不可避免地需要大量使用电力电子开关器件, 在对多台直流风机进行仿真时, 导致仿真所需时间较长。此外, 在本文所研究的范围内, 整流器和隔离型全桥 DC/DC 变换器主要起到传递功率的作用, 因此, 我们可对直流风机进行简化, 采用适用于稳态情况下的平均值模型<sup>[9]</sup>。

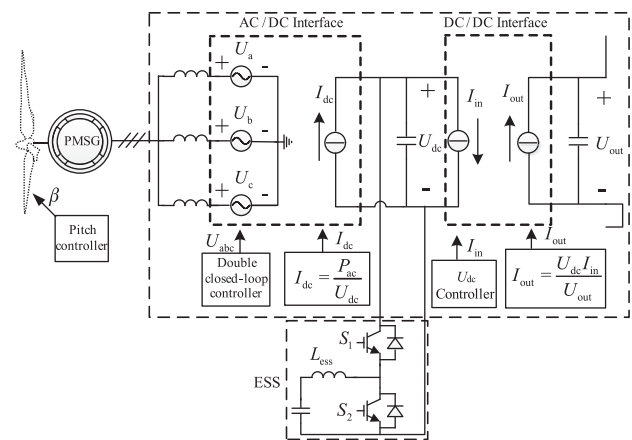


图 2 直流风机的简化模型示意图

图 2 所示为直流风机的平均值模型示意图。其中,  $\beta$  为桨距角;  $U_i (i = a, b, c)$  为机侧整流器交流侧电压;  $P_{ac}$  为发电机输出功率;  $U_{dc}$ 、 $I_{dc}$  为直流的电压和输出电流;  $I_{in}$  为 DC/DC 变换器输入电流。图中风力机和发电机部分与详细模型相同, 均保留了风力机和发电机的物理模型以及变桨控制功能。发电机右侧的方框内是直流风机变换器的等效平均值模型。AC/DC Interface 和 DC/DC Interface 方框内的电路表示根据功率平衡原理建立的机侧整流等效电路和 DC/DC 等效电路。机侧整流器的交流侧采用受控电压源代替, 直流侧采用受控电流源代替。隔离型全桥 DC/DC 变换器的低压侧和高压侧均采用受控电流源表示。此外, 储能系统保留含有电力电子开关器件的详细模型。关于直流风机简

化模型的控制将在下一部分介绍。

### 2 单个直流风机的控制

风电机组的控制包括机械控制和电气控制两部分，机械控制主要指叶片的变桨控制以及风机的偏航控制；电气控制可分为 3 个方面：机侧整流器、DC/DC 变换器及储能系统的控制。下面将对机组电气控制以及变桨控制分别进行介绍。

#### 2.1 机侧整流器的控制

机侧整流器主要用于调节发电机的输出功率，使发电机输出的有功功率能够对风能进行最大功率追踪或者根据设定输出特定的值。机侧整流器采用受控电压源和电流源进行等效，其控制系统与详细模型下整流器的控制基本相同。图 3 所示为机侧整流器的矢量控制策略，通过定子磁链定向控制策略实现对定子有功功率  $P_{ac}$  和无功功率  $Q_{ac}$  的解耦控制。功率外环分别独立地调节定子有功功率和无功功率，并产生 dq 轴电流的参考信号  $I_{dref}$ 、 $I_{qref}$  用于内环电流的控制，内环电流经过 PI 的调节后，输出机侧整流器交流侧受控电压源的幅值、相位以及频率。根据功率守恒原则，整流器直流侧受控电流源的电流  $I_{dc}$  应遵循

$$I_{dc} = P_{ac} U_{dc}^{-1} \tag{1}$$

即，直流侧输出的功率等于交流侧输入的功率。

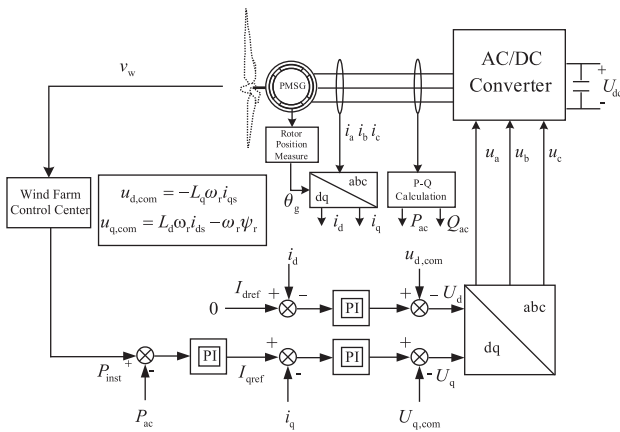


图 3 机侧整流器的控制系统示意图

#### 2.2 DC/DC 变换器的控制

DC/DC 变换器的形式有多种选择，为避免增加发电机侧的绝缘难度，DC/DC 变换器应该采用隔离型变压器，使发电机侧和高压直流侧隔离。这里 DC/DC 变换器采用输入端  $U_{dc}$  的定电压控制。

#### 2.3 储能系统的控制

图 4 所示为储能系统的布局及其控制。超级电容通过双向 DC/DC 变换器连接到机侧整流器直流链上，组成风电机组的储能系统。双向 DC/DC 变换器是可两象限运行的 DC/DC 变换器，它的输入、输出电压极性不变，输入、输出电流的方向可以改变。双向 DC/DC 变换器实现了能量的双向流动，相当于两个单向 DC/DC 变换器<sup>[4]</sup>。当流入 DC/DC 变换器的有功功率  $P_{ei}$  ( $i=1, 2, 3, \dots, N$ ,  $N$  表示并联风机个数，下同) 大于风场控制中心的指令值  $P_{ei}^*$  时，储能系统吸收直流链上多余的有功功率，双向 DC/DC 变换器工作于降压斩波 (Buck) 模式；当  $P_{ei}$  小于  $P_{ei}^*$  时，储能系统补偿功率缺额，双向 DC/DC 变换器工作于升压斩波 (Boost) 模式。

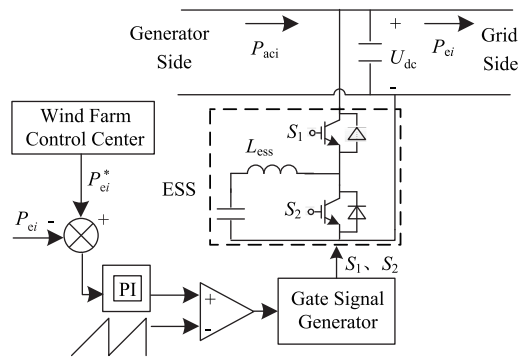


图 4 储能系统的控制

#### 2.4 变桨控制

当风速低于额定风速且风场控制中心的指令需要发电机输出最大功率时，风机处于最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 状态，变桨系统关闭；当风速低于额定风速但风机需要产生低于该风速对应的最大功率时，桨距角控制器激活，通过增大叶片的桨距角来降低叶片转速，减少风力机从风中吸收的功率，降低机械功率和发电机输出功率之间的不平衡度；同样，当风速高于额定风速时，变桨控制激活，降低风力机发出的机械功率，如图 5 所示。

### 3 风电场功率协调控制策略

该风电场协调控制策略的目的是综合考虑电网调度指令以及各个风机的风况以及储能系统的状态，生成各个风机的桨距角控制器、机侧整流器和储能系统的控制参考信号，保证各个风机发出的功

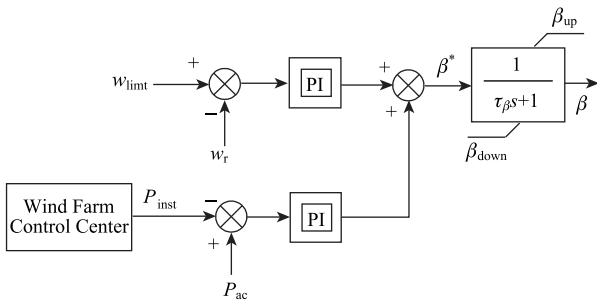


图5 桨距角控制器

率按照特定的功率指令变化,使整个风电场发出的功率满足电网调度的要求。控制策略的流程图如图6所示。

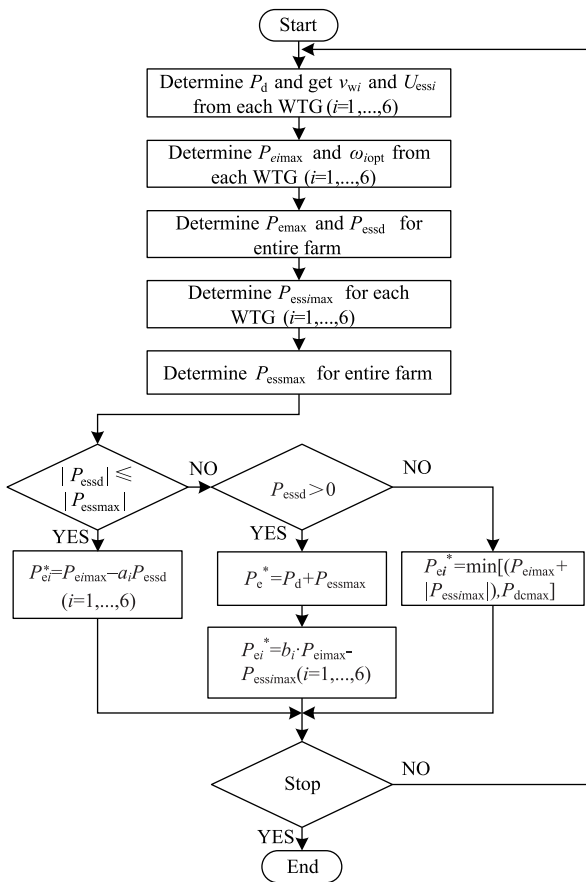


图6 风电场功率协调控制策略流程图

首先,控制策略需要分别确定电网调度指令  $P_d$ 、第  $i$  个 ( $i=1, 2, 3, \dots, N$ ,  $N$  表示并联风机个数,下同) 风机的风速  $v_{wi}$  和超级电容器组的电压  $U_{essi}$ 。其次,根据测得的风速  $v_{wi}$  确定对应的最优转速  $\omega_{iopt}$ 。根据查表法,利用算出的最优转速查出对应的风机可利用的最大有功功率  $P_{eimax}$ ,故风电场可输出的最大有功功率

$$P_{emax} = \sum_{i=1}^N P_{eimax} \quad (2)$$

为了满足电网的有功需求  $P_d$ ,  $P_d$  和风电场最大有功功率  $P_{emax}$  之间的差值  $P_{essd}$ ,即为需由风场储能系统吸收或补偿的有功功率。

$$P_{essd} = P_{emax} - P_d \quad (3)$$

另一方面,超级电容储能系统的存储能力取决于电容的容量  $C_{cap}$  以及超级电容器组的电压  $U_{essi}$ 。在正常运行状态下,  $U_{essi} \in (U_{imin}, U_{imax})$ ,其中  $U_{imin}$  和  $U_{imax}$  分别表示超级电容器组的最小和最大运行电压。超级电容器组和风机之间可交换的最大功率  $P_{essimax}$  可表示为

$$P_{essimax} = \pm C_{ess} U_{essi} |U'_{essi}|_{max} \quad (4)$$

其中  $|U'_{essi}|_{max}$  表示超级电容器组最大电压变化率,其与超级电容器组工作电流限制有关。公式(4)中,正号表示储能系统补偿风机直流母线上不足的功率,负号表示储能系统存储直流母线上多余的功率。符号的确定依赖于风机功率指令和机侧整流器实际输出功率之间的差值,若风机接收到的功率指令大于机侧整流器输出的功率,表示超级电容器组应向风机直流母线补充功率,这会使得超级电容器组电容电压下降,若  $U_{essi} \leq U_{imin}$ ,则令  $P_{essimax} = 0$ ;若  $U_{essi} > U_{imin}$  则  $P_{essimax}$  按照公式(4)计算且为正值。若风机接收到的功率指令小于机侧整流器输出的功率,表示超级电容器组应从风机直流母线吸收多余的功率,这会使得超级电容器组电容电压上升,若  $U_{essi} \geq U_{imax}$ ,则令  $P_{essimax} = 0$ ;若  $U_{essi} < U_{imax}$  则  $P_{essimax}$  按照公式(4)计算且为负值。

$P_{essimax}$  确定之后,风电场储能系统和风机之间可交换的总最大功率

$$P_{essmax} = \sum_{i=1}^N P_{essimax} \quad (5)$$

当  $P_{essmax}$  可以满足有功指令和风电场可用功率之间的差值  $P_{essd}$ ,即  $|P_{essd}| \leq |P_{essmax}|$  时,各直流风机的功率指令可表示为

$$P_{ei}^* = P_{eimax} - a_i P_{essd} \quad (6)$$

其中,系数  $a_i$  表示为

$$a_i = P_{essimax} P_{essmax}^{-1} \quad (7)$$

且  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_N$  之和为 1。

当  $|P_{essd}| > |P_{essmax}|$  时,只调节储能系统不能完全满足风场功率调度的需求,此时应考虑对风机的发电功率进行调节。若  $P_{essd} > 0$ ,风机的储能系统吸收有功功率,此时所有发电机发出的有功



功率之和的参考值  $P_c^*$  为

$$P_c^* = P_d + P_{essmax} \quad (8)$$

各直流风机输出的有功功率参考值

$$P_{ci}^* = b_i P_{cimax} - P_{essimax} \quad (9)$$

其中系数  $b_i$  表示为

$$b_i = P_c^* P_{cimax}^{-1} \quad (10)$$

各风机在收到风电场控制中心的功率指令后，一方面控制机侧整流器降低发电机的出力，另一方面控制风力机的变桨系统增大叶片的桨距角，减小风力机吸收的风能，降低风力机和机侧整流器之间的功率不平衡度。

若  $P_{essd} < 0$ ，则电网所需的功率大于发电机和储能系统所能提供的功率之和。此时风机应进行最大风能追踪，储能系统向直流母线提供有功功率，且发电机和储能系统发出的功率之和不能超过 DC/DC 变换器的最大容量。

一般情况下，系统进行功率调度时，会结合风电的功率预测进行，考虑风电场在风速波动情况下的发电能力，应尽量避免  $|P_{essd}| > |P_{essmax}|$  时， $P_{essd} < 0$  的情况出现。

由于风场采用直流集电系统并考虑到简化控制，故机侧整流器的 q 轴电流参考值  $I_{qref}$  设为 0。

### 4 仿真算例

本文仿真中采用的并联型风电场拓扑如图 7 所示，直流风机容量为 2.5MW，额定风速 13.2m/s，风机直流母线电压为 2kV，风机 DC/DC 变换器输出电压为 20kV，共有 6 台风机并联连接到 DC/DC 变换站上，经 DC/DC 变换站升压之后采用 HVDC 传输方式输送到并网点处，整个风电场额定容量为 15MW。汇集系统直流母线电压由 DC/DC 变换站控制。风机所用超级电容设计成可连续提供 20% 的永磁同步发电机额定功率 60s。经过计算，电容的容量为 60F，且超级电容储能系统的最大充放电功率设定为  $\pm 0.7$ MW。为了简化模型，DC/DC 变换站到电网的部分采用恒定直流电压源代替。

为模拟风速变化，可将 PSCAD 中风源模块设定成 Gust 模式并进行叠加，得到在  $13\text{m/s} \pm 2\text{m/s}$  内波动的风速曲线，通过改变各 Gust 的周期使得风机之间风速曲线均不相同，如图 8 所示为 1 号风机的风速曲线。

在风电场运行过程中，本文提出的风电场功率

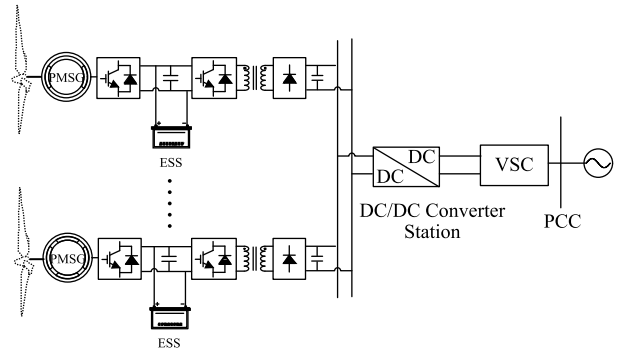


图 7 直流并联型风电场示意图

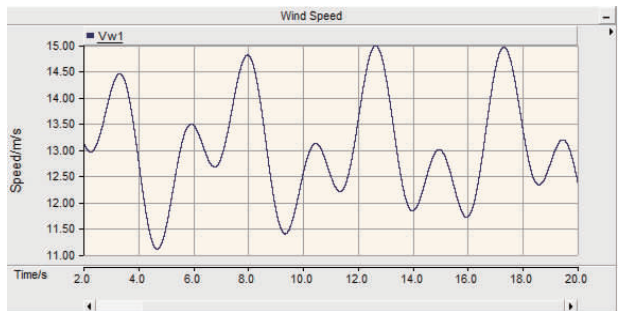


图 8 1 号风机风速变化曲线

控制策略会根据各个风机的风况以及储能单元的状态来分配有功指令，以确保风电场发出的有功功率能够最大限度地满足电网调度指令的要求。图 9 中显示了 1 号风电机组接收到的有功指令  $P_{cl}^*$ 、风电机组实际输出的有功功率  $P_{cl}$  以及发电机输出的有功功率  $P_{acl}$  随时间的变化情况。从图中可以看到，风速的波动会造成发电机输出功率变化，风电机组的输出功率可以较好地跟随风电机组输出功率参考值变化。图 10 所示为 1 号风机储能充放电功率变化情况。

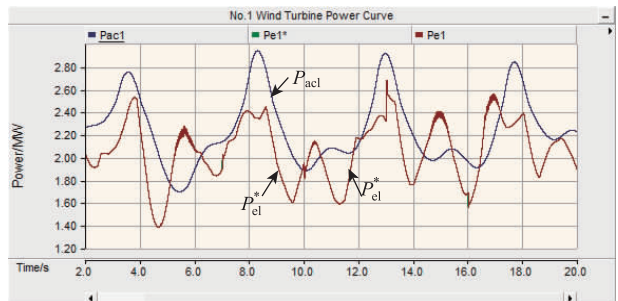


图 9 1 号风机有功指令  $P_{cl}^*$ 、直流风机实际输出的有功功率  $P_{cl}$  以及发电机输出的有功功率  $P_{acl}$  变化曲线

各个直流风机输出功率之和等于  $P_{out}$ ，如图 11 所示，电网调度指令  $P_d$  和直流风场输出功率  $P_{out}$  随时间

变化。由图可知,在一定的功率范围内, $P_{out}$ 可满足 $P_d$ 的变化需求,这就证明了本控制策略的有效性。

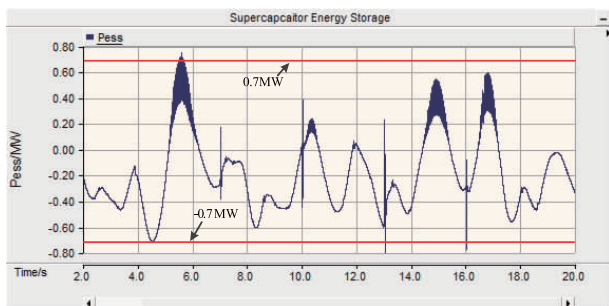


图 10 1号风机储能充放电功率

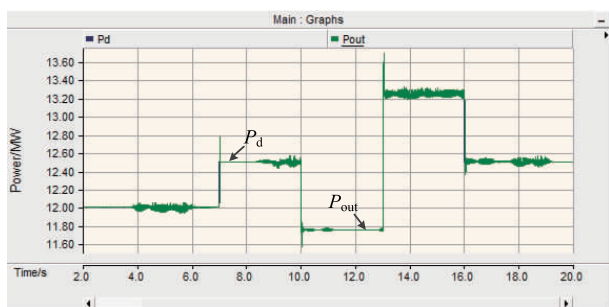


图 11 电网调度指令与风电场实际输出功率

图 12 所示为 1 号风机的超级电容储能单元中电容电压随时间的变化情况。超级电容的初始电压设为 1kV,在正常运行情况下,超级电容的电压应维持在  $[0.5\text{kV}, 1.1\text{kV}]$  内<sup>[8]</sup>。

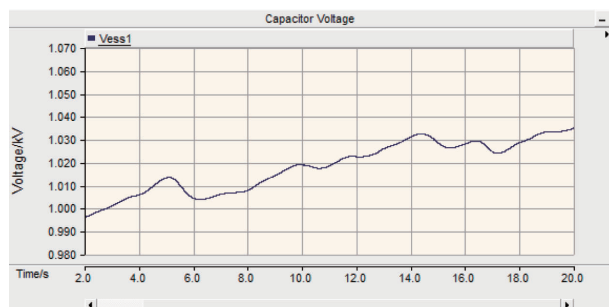


图 12 超级电容电压

## 5 结论

本文提出了一种用于直流并联型风电场的风机功率协调控制方案。该控制方案根据风场中风机的运行情况和运行环境,向各个直流风机发送功率指令,调节各直流风机的功率,使风电场输出的有功功率满足电网需求。

对一个含有 6 台 2.5MW 直流风机的并联型直流风电场的模型仿真发现,本控制策略可有效控制风电场的输出功率,验证了该控制策略的有效性,使风电出力对电网更加友好。在实际应用中,需对风速波动情况下电网的调度指令以及储能系统的容量进行优化,以便在保证经济性的同时,最大限度地避免出现储能系统不能完全补偿或吸收风电场功率缺额的情况。

## 参 考 文 献

- [1] 朱星阳,刘文霞,张建华,等. 电力系统随机潮流及其安全评估应用研究综述 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 257-270.
- [2] 何大清. 基于直流串联的海上风电场及其控制 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [3] 袁小明,程时杰,文劲宇. 储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 14-18.
- [4] 姜喆,尹忠东. 超级电容器在光伏并网系统功率控制中的应用 [J]. 储能科学与技术, 2013(3): 222-226.
- [5] 张文亮,丘明,来小康. 储能技术在电力系统中的应用 [J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.
- [6] Díaz-González F, Sumper A, Gomis-Bellmunt O, et al. A review of energy storage technologies for wind power applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(4): 2154-2171.
- [7] 谷峰. 基于双馈机组风电场的功率控制研究 [D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [8] Qu L, Qiao W. Constant power control of DFIG wind turbines with supercapacitor energy storage [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(1): 359-367.
- [9] Shi G, Zhu M, Cai X, et al. Generalized average model of DC wind turbine with consideration of electromechanical transients [C] //IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE. Vienna, Austria, 2013.

收稿日期: 2016-11-18

作者简介:

常超(1985—),男,工学硕士,工程师,主要从事电网及新能源设计咨询、新能源发电及并网技术工作, E-mail: ccsyxa@sohu.com;

史阳(1984—),男,工学硕士,工程师,主要从事风力发电及并网技术工作。

(责任编辑:林海文)