

DOI: 10.19666/j.rlfed.202402035

## 风储一体化系统无功响应技术研究

张宝锋<sup>1</sup>, 宋子琛<sup>1</sup>, 王剑彬<sup>2</sup>, 高斌<sup>2</sup>, 吴叙锐<sup>2</sup>, 陈宝桥<sup>3</sup>,  
童博<sup>1</sup>, 朱尤省<sup>1</sup>, 赵勇<sup>1</sup>

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

2.华能新能源股份有限公司广东分公司, 广东 广州 510000;

3.西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710048)

[摘要] 针对永磁直驱风机与分散式混合储能系统提出了联合无功控制策略。首先对永磁直驱风机以及储能系统的无功调节能力进行分析, 确定永磁直驱风机与储能系统通过变流器控制均可参与无功调节; 其次提出无功控制策略, 从信号接收、初次分配、内部分配等方面进行分析, 在初次分配中采用了等裕度分配方法, 在内部分配中考虑了以储能优先出力进行比例分配; 最后通过仿真验证了该策略的有效性, 该策略可充分利用永磁直驱风机与储能系统的无功容量能力对电网的电压提供有效支撑。

[关键词] 永磁直驱风机; 风储一体化系统; 分散式储能; 无功分配; 电压调节

[引用本文格式] 张宝锋, 宋子琛, 王剑彬, 等. 风储一体化系统无功响应技术研究[J]. 热力发电, 2024, 53(8): 135-142.  
ZHANG Baofeng, SONG Zichen, WANG Jianbin, et al. Reactive power response technology of wind-storage integrated system[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(8): 135-142.

### Reactive power response technology of wind-storage integrated system

ZHANG Baofeng<sup>1</sup>, SONG Zichen<sup>1</sup>, WANG Jianbin<sup>2</sup>, GAO Bin<sup>2</sup>, WU Xurui<sup>2</sup>, CHEN Baoqiao<sup>3</sup>,  
TONG Bo<sup>1</sup>, ZHU Yousheng<sup>1</sup>, ZHAO Yong<sup>1</sup>

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

2. Huaneng Renewable Corporation Limited Guangdong Branch, Guangzhou 510000, China;

3. School of Electrical Engineering Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** A combined reactive power control strategy for permanent magnet direct-drive wind turbine and distributed hybrid energy storage system is proposed. Firstly, the reactive power regulation capability of the permanent magnet direct-drive wind turbine and energy storage system is analyzed, and it is determined that both the wind turbine and energy storage system can participate in reactive power regulation through converter control. Secondly, the reactive power control strategy is put forward, which is presented in terms of signal reception, initial allocation, and internal allocation. In initial allocation, the equal margin allocation method is adopted. In internal allocation, the proportional allocation with the priority output of energy storage is considered. Finally, the effectiveness of the strategy is verified by simulation, it shows that the power grid voltage can be supported by fully utilizing the reactive capacity of the wind turbine and energy storage system.

**Key words:** permanent magnetic direct-drive wind turbine; integrated wind storage system; distributed energy storage; reactive power allocation; voltage regulation

在实现“双碳”目标的过程中, 风能、太阳能等可再生能源在电力系统中的装机容量不断增加, 呈上升趋势, 而风电出力具有间歇性与波动性, 对电压的波动影响较大<sup>[1-2]</sup>, 其自身具有的无功调节能

力有限, 而储能充放电的双向特性以及快速响应特性, 有助于进一步平抑电压波动。将风储联合进行协调控制, 通过储能的充放电控制, 可大大减少风电并网带来的电压影响。

收稿日期: 2024-02-19

基金项目: 中国华能集团有限公司科技项目 (HNKJ22-H21)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ22-H21)

第一作者简介: 张宝锋 (1977), 男, 高级工程师, 主要研究方向为新型能源与储能系统, zhangbaofeng@tpri.com.cn。

传统风电场通过使用传统无功补偿装置进行无功补偿<sup>[3-5]</sup>，而风储联合的发电系统，永磁直驱风机与储能配合除了发出有功功率稳定频率，还可以发出无功功率稳定电压<sup>[6-7]</sup>。高效利用永磁直驱风机与储能的无功能力可有效提升并网点电能质量<sup>[8-11]</sup>，实现对电网的主动支撑。对于混合储能，在有功分配调节方面通常使用荷电状态（state of charge, SOC）作为判断有功出力能力的指标，对于无功分配方面则考虑较少。

因此，本文针对永磁直驱风机、分散式混合储能联合的发电系统，对其无功调节能力进行分析，同时对其无功分配方式提出策略。

## 1 风机与储能的无功调节能力分析

### 1.1 永磁直驱风机无功调节能力

永磁直驱风电机组主要由风力机、永磁同步发电机（permanent magnet synchronous generator, PMSG）、发电机侧变流器和电网侧变流器组成，其结构如图 1 所示。

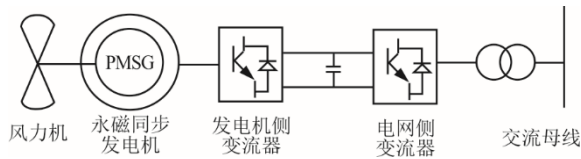


图 1 永磁直驱风电机组组成结构

Fig.1 Structure of the permanent magnet direct-drive wind power generation unit

#### 1.1.1 永磁直驱风机传动系统及 PMSG 模型

风力机用来实现动能与机械能之间的转化，风力机实际捕获的功率可表示为：

$$P_o = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

式中： $\rho$ 为空气密度； $R$ 为永磁直驱风机叶片半径； $v$ 为风速； $C_p$ 为永磁直驱风机转化风能的风能利用系数。

风能利用系数与叶尖速比、桨距角之间存在关系，可以表示为一个函数，如式(2)：

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\theta} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\theta}} \\ \frac{1}{\theta} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \\ \lambda = \frac{R\omega_m}{v} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\beta$ 为桨距角； $\omega_m$ 为风力机叶片旋转的角速度； $\lambda$ 为叶尖速比。

在永磁直驱风机中，风速变化时，永磁直驱风机转速随之变化，最大功率跟踪控制一般是在最大风能利用区内进行，此时风速在切入风速与风力机额定风速之间。本文的研究在额定风速以下进行，因永磁直驱风机相比于双馈式风力发电机，风力机与发电机之间直接连接，没有齿轮箱，故风力机与发电机两者风速相同。因此实现最大风能捕获可以采用控制电机转速和电磁转矩的方式。

永磁直驱风机机械功率、转速、风速之间存在一定的关系。对于固定桨距角，且风速小于额定风速的情况，都有对应的最佳转速值，因此可以通过控制发电机的转速来实现对风力机的控制。在发电机侧变流器控制中，通过增加转速外环来具体实现。实现过程为：首先通过计算得出此时的实际转速；其次与最佳目标转速相比较，其误差值经过 PI 控制器调节后进入发电机侧控制，通过控制发电机侧变流器所产生的控制信号，来调节永磁直驱风机转速；最后实现最佳叶尖速比控制。

#### 1.1.2 永磁直驱风机发电机侧变换器及其控制策略

在本文建立的模型中发电机侧变流器主要用于控制电磁功率，实现最大功率跟踪。本文建模中发电机侧变流器采用了转子磁链定向的矢量控制，即将  $d$  轴定向于 PMSG 永磁体磁链  $\psi_f$  方向。在此控制中为实现解耦控制，控制定子  $d$  轴电流为 0，其定子输出的有功功率可以进一步进行简化：

$$P_s = -\frac{3}{2} u_{sq} i_{sq} \approx -\frac{3}{2} \omega_e \psi_f i_{sq} \quad (3)$$

式中： $\omega_e$ 为发电机转子旋转的角速度。

由式(3)可知，控制  $q$  轴电流  $i_{sq}$  可实现对电磁功率  $P_s$  的控制。结合风力机的控制策略，这里采用一个转速外环，可将参考的目标转速  $n^*$  和实际转速值  $n$  进行偏差计算，再经过 PI 调节，可以得到  $q$  轴电流的参考值  $i_{sqref}$ 。由初始模型分析可知，控制定子  $d$  轴电流为 0，所以设  $d$  轴电流的参考值也为 0。

通过解耦， $dq$  轴的电压可以表示为：

$$\begin{cases} u_{sdref} = u'_{sd} + \Delta u_{sd} \\ u_{sqref} = u'_{sq} + \Delta u_{sq} \end{cases} \quad (4)$$

其中电压补偿项为：

$$\begin{cases} \Delta u_{sd} = -\omega_e L_{sq} i_{sq} \\ \Delta u_{sq} = \omega_e L_{sd} i_{sd} + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (5)$$

式中： $L_{sd}$ 、 $L_{sq}$ 分别为永磁直驱风机  $d$  轴、 $q$  轴上的电感。



定量的无功功率支持。

变流器发电机侧和电网侧的电压和频率相互解耦。永磁直驱风机的并网电气特性与发电机侧变流器关系不大,主要取决于并网侧变流器的技术性能。在变流器最大允许电流的限制下,单台永磁直驱风机的额定视在功率是确定的,其输出视在功率不能超过额定值。在较短的时间内,变流器可以工作在额定容量的 110%,其具备的无功调节能力受到视在功率和当前时刻的有功功率限制。

## 1.2 储能无功调节能力

储能系统采用蓄电池模块和超级电容模块作为出力单元,其均经过 DC/AC 逆变器后接入电网交流母线,逆变器控制如图 5 所示。

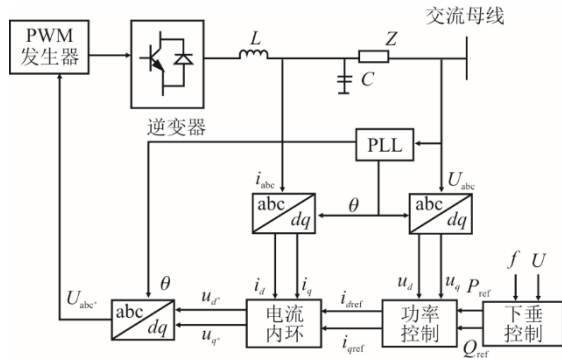


图 5 储能变流器控制

Fig.5 Control block diagram of the energy storage converter

在储能并网过程中,电网电压与变流器输出电压关系如式(13):

$$\begin{cases} L \frac{di_{invd}}{dt} = -Ri_{invd} + \omega_o Li_{invq} + u_{invd} - u_{gd} \\ L \frac{di_{invq}}{dt} = -Ri_{invq} + \omega_o Li_{invd} + u_{invq} - u_{gq} \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} = i_{dc} - (i_{invd} S_d + i_{invq} S_q) \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $L$  为交流等效电感;  $i_{invd}$ 、 $i_{invq}$  为储能变流器的输出电流分量;  $R$  为等效输出电阻;  $\omega_o$  为角速度;  $u_{invq}$ 、 $u_{invd}$  为储能变流器输出电压;  $u_{gd}$ 、 $u_{gq}$  为电网电压;  $C$  为电容;  $S_d$ 、 $S_q$  分别为电力电子开关控制在  $d$  轴与  $q$  轴的分量。

对于变流器输出电流的  $dq$  轴分量存在耦合关系,为了便于控制,引入了  $u_d$ 、 $u_q$  来进行解耦:

$$\begin{cases} u_d = \omega_o Li_{invq} + u_{invd} - u_{gd} = L \frac{di_{invd}}{dt} + Ri_{invd} \\ u_q = -\omega_o Li_{invd} + u_{invq} - u_{gq} = L \frac{di_{invq}}{dt} + Ri_{invq} \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可知,  $d$ 、 $q$  轴电流分量成功解耦,一直处于独立的状态。基于瞬时无功功率与等幅值变换的理论方法,储能经过逆变器输出的有功、无功功率计算式如式(15):

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} (i_{invd} u_{gd} + i_{invq} u_{gq}) \\ Q = \frac{3}{2} (i_{invd} u_{gq} - i_{invq} u_{gd}) \end{cases} \quad (15)$$

对式(15)进一步求解可得到  $d$ 、 $q$  轴电流参考值为:

$$\begin{bmatrix} i_{dref} \\ i_{qref} \end{bmatrix} = \frac{2}{3\Delta} \begin{bmatrix} u_{gd} & -u_{gq} \\ u_{gq} & u_{gd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中:  $\Delta = u_{gd}^2 + u_{gq}^2$ ;  $P_{ref}$ 、 $Q_{ref}$  分别为有功功率、无功功率指令参考值。

在对逆变器进行定向控制时,令  $u_{gd}=u_g$ 、 $u_{gq}=0$ ,可将式(16)简化为:

$$\begin{cases} i_{dref} = \frac{2}{3} \frac{P}{u_{gd}} \\ i_{dref} = -\frac{2}{3} \frac{Q}{u_{gd}} \end{cases} \quad (17)$$

对于储能系统可在检测到电压与频率波动后经过下垂控制调节变流器发出的有功/无功功率参考值,进行有功/无功响应。无功功率受储能逆变器剩余容量的限制。这是因为在当前的工程应用中,根据实际电网要求,储能系统主要用于电力系统调峰、调频等有功功率场景。当逆变器容量过剩时,考虑控制储能系统充放无功功率参与电网电压调节,因此最大充放电无功功率不应超过逆变器的剩余容量,如式(18):

$$\begin{cases} |Q_B| \leq \sqrt{S_B^2 - P_B^2} \\ |P_B| \leq S_B \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $P_B$ 、 $Q_B$ 、 $S_B$  分别为储能有功功率、无功功率与视在功率,下标 B 代表储能。

## 1.3 风储一体化结构及控制方法

单一风储一体系统拓扑如图 6 所示。

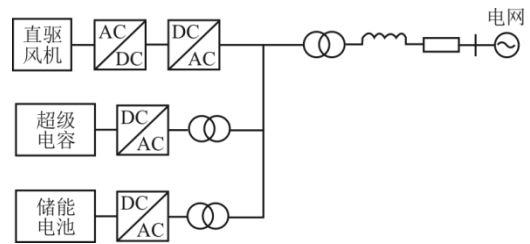


图 6 风储一体并网拓扑

Fig.6 Topology of the wind storage integrated grid

由图6可知,超级电容、蓄电池分别经过DC/AC环节与变压器后逆变为交流电,永磁直驱风机经过背靠背变流器并网,再一起经由变压器和线路接入到大电网当中。

当系统受到扰动电压变化或上级下发无功指令时,永磁直驱风机、超级电容、储能电池分别根据自己容量及总体无功需求进行出力<sup>[14-16]</sup>。

## 2 风储联合发电系统无功调节策略

针对由风储一体化机组组成的风储联合发电系统,对其自动电压调节控制提出适应的无功控制策略,具体操作步骤如下。

1) 判断是否进行无功调控,根据电压偏差确定无功指令,并检测各机组信号。

根据场站上层调度指令,判断风储一体化发电场站是否参与自动电压控制过程,若上级下发无功目标指令,则场站参与无功控制;若无无功目标指令,则场站不动作。

可由式(19)预估任意时刻电站的无功功率需求 $Q_{ref}(t)$ ,或直接从调度指令确定:

$$Q_{ref}(t) = (U_g(t) - U_{ref})k_{droop} \quad (19)$$

式中: $U_g(t)$ 为 $t$ 时刻并网点电压的测量值; $U_{ref}$ 为电压调节目标值; $k_{droop}$ 为无功下垂系数,对于不同系统可通过经验值测定。

采集场站内各永磁直驱风机、各储能单元、无功补偿设备的信号。同时可确定汇集站区域内各风电机组、各储能单元无功功率的调节范围,并收集各无功发出设备无功功率的可提供容量等信息。

单个风储一体化可发/吸收无功容量为永磁直驱风机与储能无功容量总和,如式(20):

$$Q_{WSi,max} = Q_{wti,max} + Q_{sci,max} + Q_{bati,max} \quad (20)$$

式中: $Q_{WSi,max}$ 为第 $i$ 个风储一体化单元最大可发/吸收无功容量; $Q_{wti,max}$ 、 $Q_{sci,max}$ 、 $Q_{bati,max}$ 分别为第 $i$ 个风储一体化单元内永磁直驱风机、超级电容、蓄电池的最大无功能力。

2) 在场站层,以风储优先、无功补偿装置最后的优先级进行无功目标的初步分配,结合各单元无功出力能力,等裕度进行无功二次分配,平衡各机组无功出力。

为进一步发挥永磁直驱风机与储能自身的无功性能,减少无功补偿设备配置,提高经济性,设计了场站级无功调节设备优先级。无功调节的优先级为:风储联合系统在前;无功补偿设备在后。

场站级进行初次分配如式(21),根据无功指令与风储联合系统的无功能力确定场站风储联合系统的出力值。

$$\begin{cases} Q_{WS,ref} = Q_{WS,can}, & Q_{WS,can} \leq Q_{ref} \\ Q_{WS,ref} = Q_{ref}, & Q_{WS,can} > Q_{ref} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $Q_{ref}$ 为无功功率需求值; $Q_{WS,can}$ 为各风储一体化单元可发容量之和; $Q_{WS,ref}$ 为向总风储联合系统实际下发的无功功率指令。

其次对剩余所需的无功调节量与静止无功发生器(static var generator, SVG)所能发出无功功率的容量进行比较,若所需的无功调节量大于SVG所能发出无功功率的容量,则SVG满发,对于无法调节的无功,可进一步采用变压器进行调控,否则,将所需的无功调节量合理分配给SVG,如式(22):

$$\begin{cases} Q_{svg} = Q_{svg,can}, & Q_{svg,can} \leq Q_{ref} - Q_{WS} \\ Q_{svg} = Q_{ref} - Q_{WS}, & Q_{svg,can} > Q_{ref} - Q_{WS} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $Q_{ref} - Q_{WS}$ 为剩余所需无功功率值; $Q_{svg,can}$ 为SVG可发的无功功率大小; $Q_{svg}$ 为实际下发给SVG的无功功率指令。

最后将上述无功分配量分配至由多个风储一体化单元组成的风储联合场站,将接收到的控制指令分发到场站内各风储一体化单元。对于风储联合内的各单元间无功分配,为了平衡各机组无功出力,将根据式(23)计算各风储一体化系统的无功裕度系数。

$$\alpha_i = \frac{\frac{Q_{WSi,max}}{Q_{WS,max} - Q_{WSi,max}}}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_{WSi,max}}{Q_{WS,max} - Q_{WSi,max}} \right)} \quad (23)$$

式中: $\alpha$ 为无功裕度系数; $n$ 为风储一体化单元数量; $Q_{WSi,max}$ 为第 $i$ 个风储一体化所能发出的最大无功值。

再依照各台风储一体化组的无功裕度大小,按其无功裕度比例将上级调度中心下发的风储无功总指令分配到各风储一体化单元,并且根据各风储单元的无功裕度系数来调整无功指令,实时计算各机组的无功功率出力目标值,如式(24):

$$Q_{WSi,ref} = \alpha_i Q_{WS,ref} \quad (24)$$

式中: $Q_{WS,ref}$ 为风储部分的无功补偿需求值。

对机组无功出力目标值与机组所能发出无功值进行比较如式(25),从而确定风储一体化机组最

终实际指令。

$$\begin{cases} Q_{i,WS} = Q_{WSi,max}, & Q_{WSi,max} \leq Q_{WSi,ref} \\ Q_{i,WS} = Q_{WSi,ref}, & Q_{WSi,max} > Q_{WSi,ref} \end{cases} \quad (25)$$

式中： $Q_{i,WS}$  为第  $i$  个风储机组的实际出力指令值。

3) 在风储一体化机组层，根据机组的有功运行情况以及无功能力，以储能优先的优先级进行无功分配。

对于风储一体化机组内无功分配，根据机组实时信号确定永磁直驱风机、蓄电池、超级电容单元可发的无功大小范围。对于永磁直驱风机，其无功出力能力受限于电网侧变流器；对于储能，其无功出力通过变流器实现。

按总风储机组需要向电网提供或消纳的无功功率大小优先分配给混合储能，储能无法提供或消纳的无功功率由永磁直驱风机提供。

如果无功目标大于混合储能出力能力，储能无功全发，剩余指令由永磁直驱风机出力。

$$\begin{cases} Q_{bati,ref} = Q_{bati,max} \\ Q_{sci,ref} = Q_{sci,max} \\ Q_{wti,ref} = Q_{WSi,ref} - (Q_{bati,ref} + Q_{sci,ref}) \end{cases} \quad (26)$$

如果无功目标小于混合储能出力能力，储能等比例进行出力，永磁直驱风机不出力。

$$\begin{cases} Q_{bati,ref} = \frac{Q_{bati,max}}{Q_{bati,max} + Q_{sci,max}} Q_{WSi,ref} \\ Q_{sci,ref} = \frac{Q_{sci,max}}{Q_{bati,max} + Q_{sci,max}} Q_{WSi,ref} \\ Q_{wti,ref} = 0 \end{cases} \quad (27)$$

式中： $Q_{wti,max}$  为第  $i$  个永磁直驱风机可发最大无功值； $Q_{bati,max}$  为第  $i$  个蓄电池单元可发最大无功值； $Q_{sci,max}$  为第  $i$  个超级电容可发最大无功值； $Q_{wti,ref}$  为第  $i$  个永磁直驱风机单元无功功率出力目标值； $Q_{WSi,ref}$  为第  $i$  个风储单元总的无功补偿需求值。

确定各永磁直驱风机与储能的实际无功出力指令值后下达至各机组。各机组根据指令出力，通过控制变流器可实现永磁直驱风机与储能根据无功指令实现无功输出，永磁直驱风机与储能均具有无功调节的能力。风储一体并网无功调节策略流程如图 7 所示。

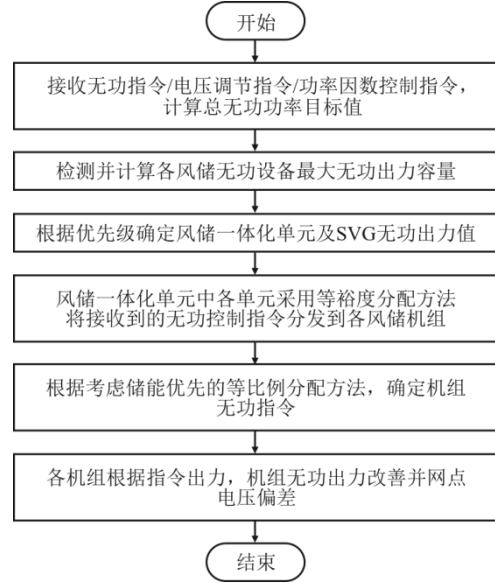


图 7 风储一体并网无功调节策略流程  
Fig.7 Flow chart of reactive power regulation strategy for the integrated wind storage grid

## 3 仿真验证

### 3.1 仿真模型

为验证本文所提风储联合系统的无功控制策略的有效性，在 MATLAB 平台构建风储联合发电系统仿真模型，对无功功率分配的过程进行仿真。风储一体化单元包括额定容量为 3 MW 的永磁直驱风机，以及 300 kW/300 kW·h 的锂电池和超级电容，与永磁直驱风机交流侧连接构成风储一体化单元，经变压器到 35 kV 集电线路。

选取典型日 24 h 运行情况进行分析，根据永磁直驱风机与储能有功出力等信息进行潮流计算，求得节点电压，根据上级下发无功指令或电压指令，求得并网点无功目标。

### 3.2 仿真结果

根据风储单元出力能力进行无功一次分配，依据优先级将无功目标值分配于风储联合系统与场站层的无功补偿单元，随后计算风储单元无功裕度系数，进行无功二次分配，得到风储单元间的无功调控结果。本文共选取 6 个出力能力不同的风储一体单元来组成风储联合系统，图 8 为选取典型日 24 h 运行情况各风储一体化单元之间的无功分配结果。

根据各个风储单元之间的无功调控分配结果，按照风储一体化单元建立模型，考虑储能无功出力优先情况，将各个风储一体单元的无功目标分配至

风机、蓄电池与超级电容，其分配结果如图 9 所示，蓝色为永磁直驱风机无功出力情况、橙色为蓄电池无功出力情况、黄色为超级电容无功出力情况。

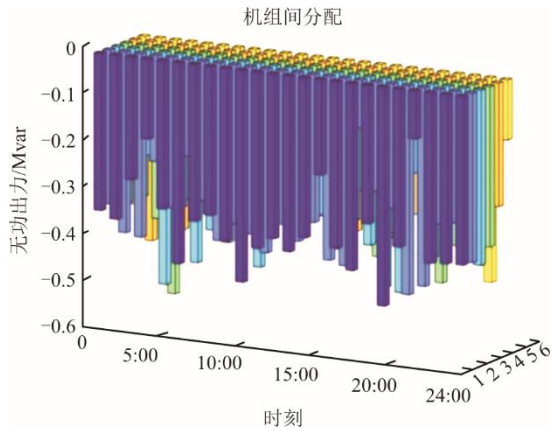


图 8 风储一体化单元间无功分配结果  
Fig.8 The result of reactive power distribution among integrated wind storage units

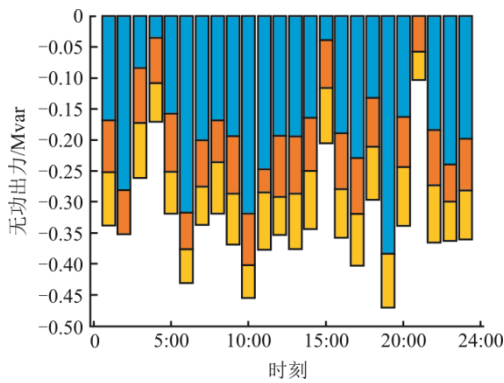


图 9 风储一体化内部无功分配结果  
Fig.9 The result of reactive power distribution in the integrated wind storage unit

进行无功调节前后并网点电压情况如图 10 所示。

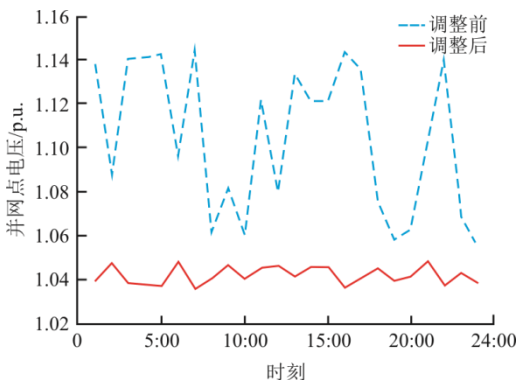


图 10 无功调节电压对比  
Fig.10 Comparison of the reactive power regulation voltage

由图 10 可见，由于正常运行时有功功率、无功功率在不停波动，使得并网点电压偏离额定值在

1.054 p.u.附近，引入本文所提的风储无功功率分配策略后，并网点电压稳定在 1.047 p.u.，电压偏离的程度降低，本文所采用的风储一体化系统无功响应技术具有保持电压稳定的功能。

通过仿真测试结果分析，本文所研究的风储联合发电系统无功响应技术可根据永磁直驱风机与储能无功能力合理分配无功目标，对于提高电网无功调节能力以及风储联合发电系统运行的稳定性具有重要意义。

### 4 结 语

本文重点研究永磁直驱风机和混合储能一体化系统的无功功率控制问题。分析并确定了永磁直驱风机和储能的无功功率调节能力。分析了一体化系统的无功功率控制策略，包括信号接收、初始分配和内部分配。在调节过程中，可根据无功功率指令或电压调节指令，并将其转换为无功功率目标值。在初始分配中，首先根据优先级进行分配。然后在多个风储集成单元中采用等裕度分配法。在内部分配中，引入衡量储能无功功率容量的类型系数。通过比例分配，可获得系统中每个无功输出单元的无功功率指令。通过仿真验证了该策略的有效性，利用永磁直驱风机和储能的无功容量能力，实现对电网的电压有效支撑，有利于稳定系统。

### [参 考 文 献]

- [1] 刘友宽, 余盛超, 张君. 基于 DCS 的风电场 AGC 与 AVC 系统开发与利用[J]. 仪器仪表用户, 2023, 30(12): 96-99.  
LIU Youkuan, SHE Shengchao, ZHANG Jun. Development and utilization of wind farm AGC and AVC systems based on DCS[J]. Instrumentation, 2023, 30(12): 96-99.
- [2] 华亮亮, 郭天飞, 张莞嘉, 等. 分布式控制模式下的分散式风电无功电压控制策略[J]. 现代电力, 2021, 38(1): 101-110.  
HUA Liangliang, GUO Tianfei, ZHANG Wanjia, et al. Reactive voltage control strategy for decentralized wind power generation in distributed control mod[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(1): 101-110.
- [3] 刘颖明, 刘闯闯, 王晓东. 基于风电机组无功裕度预测的风电场无功分层控制策略[J]. 可再生能源, 2021, 39(3): 380-387.  
LIU Yingming, LIU Chuangchuang, WANG Xiaodong. Reactive power hierarchical control strategy for wind farm based on reactive power margin prediction of wind turbines[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(3): 380-387.
- [4] 侯祖锋, 陈建钿, 丘冠新, 等. 考虑分布式电源无功调节的配电网两级动态无功调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 158-164.

- HOU Zufeng, CHEN Jiandian, QIU Guanxin, et al. Two-level dynamic reactive power scheduling strategy in a distribution network considering reactive power regulation of distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(6): 158-164.
- [5] ASADOLLAH S, ZHU R, LISERRE M. Analysis of voltage control strategies for wind farms[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(2): 1002-1012.
- [6] 杨蕾, 周宗仁, 郭成, 等. SVG 协同风电场的电网电压稳定控制策略研究[J]. *电工电能新技术*, 2020, 39(10): 55-64.
- YANG Lei, ZHOU Zongren, GUO Cheng, et al. Study on voltage stability control strategy of power grid with SVG coordinated wind farm[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2020, 39(10): 55-64.
- [7] LI L, YANG C, XU H, et al. Coordinated voltage control for offshore wind farm equipped with SVG and energy storage[C]. 2022 12th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), Guangzhou, China, 2022.
- [8] BANGUERO E, CORRECHER A, PÉREZ-NAVARRO Á, et al. A review on battery charging and discharging control strategies: application to renewable energy systems[J]. *Energies*, 2018, 11: 10-21.
- [9] LI B, MO X, CHEN B. Direct control strategy of real-time tracking power generation plan for wind power and battery energy storage combined system[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 147169-147178.
- [10] WANG K, XIE L, QIAO Y. Curtailed wind consumption mode based on threshold setting and hierarchical control of retired batteries[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(10): 92-98.
- [11] NETO P J D S, PINTO A C, BARROS T A D S, et al. A proposal to control active and reactive power in distributed generation systems using small wind turbines[J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2020, 18(10): 1699-1706.
- [12] OUYANG J, ANGT T, YAO J, et al. Active voltage control for DFIG-based wind farm integrated power system by coordinating active and reactive powers under wind speed variations[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2019, 34(3): 1504-1511.
- [13] GHAZAVIDOZEIN M, GOMIS-BELLMUNT O, MANCARELLA P. Simultaneous provision of dynamic active and reactive power response from utility-scale battery energy storage systems in weak grids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(6): 5548-5557.
- [14] WU X, JIANG Y. Source-network-storage joint planning considering energy storage systems and wind power integration[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 137330-137343.
- [15] DAI J F, LEI W, PING C, et al. Reactive voltage control strategy for PMSG-based wind farm considering reactive power adequacy and terminal voltage balance[J]. *Electronics*, 2022, 11(11): 1766.
- [16] LIU J H, CHENG J S. Online voltage security enhancement using voltage sensitivity-based coherent reactive power control in multi-area wind power generation systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(3): 2729-2732.

(责任编辑 杨乐)