

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191375

# 利用调相机提升送端双馈风机高电压穿越能力的协调控制

詹锦<sup>1</sup>, 陈波<sup>2</sup>, 熊永新<sup>1</sup>, 程思萌<sup>2</sup>, 姚伟<sup>1</sup>, 陶翔<sup>2</sup>, 文劲宇<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院(强电磁工程与新技术国家重点实验室), 湖北 武汉 430074;

2. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

**摘要:** 提出了一种利用同步调相机提升送端双馈风电场高电压穿越能力的无功协调控制策略, 以避免风电场大规模脱网。大容量同步调相机由于其动态无功支撑和短时过载能力强, 现已广泛应用于直流输电系统中, 然而由于同步调相机的响应时间有限, 其故障时无功出力会出现滞后。在分析了双馈风机和调相机的无功出力特性后, 提出了一种无功协调控制策略。在部署同步调相机的同时, 通过在故障暂态期间控制风电场参与无功调节, 可以优化电网电压骤升期间的无功补偿。并在故障后稳态期间控制风电场退出无功调节, 使得故障恢复后风电场能更快进入正常运行。在系统发生直流闭锁、小无功扰动或连续换相失败等故障下的仿真结果表明, 协调控制方法可以在故障期间有效降低风机峰值端电压, 加快系统电压恢复。

**关键词:** 高电压穿越; 双馈风机; 直流输电; 同步调相机; 协调控制

## Coordinated control for improving the HVRT capability of a DFIG wind farm using a synchronous condenser

ZHAN Jin<sup>1</sup>, CHEN Bo<sup>2</sup>, XIONG Yongxin<sup>1</sup>, CHENG Simeng<sup>2</sup>, YAO Wei<sup>1</sup>, TAO Xiang<sup>2</sup>, WEN Jinyu<sup>1</sup>

(1. School of Electric and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology (State Key

Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology), Wuhan 430074, China;

2. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China)

**Abstract:** This paper proposes a coordinated reactive power control strategy using a synchronous condenser to improve the High-Voltage Ride-Through (HVRT) ability of a Doubly-Fed Induction Generators (DFIG) wind farm and thus avoids tripping off of wind turbines. Because of its dynamic reactive power support and strong short-time overload capacity, the large capacity synchronous condenser has now been widely deployed in HVDC systems. However, the reactive power support of a synchronous condenser lags because of its response time limit when the grid fails. Based on the reactive power characteristics of a DFIG and synchronous condensers, a coordinated reactive power control strategy is proposed to optimize the reactive power flow during grid voltage swell. With the synchronous condenser deployed, the DFIG wind farm is controlled to participate in reactive power compensation during fault transients. The wind farm stops reactive power compensation during the steady-state period after a fault, so that the wind farm can enter normal operation more quickly after fault recovery. The simulation results in the case of DC-link block, small reactive power disturbance and continuous commutation failure show that the proposed strategy can effectively reduce the peak terminal voltage of wind turbines and accelerate system voltage recovery.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577075) and Science and Technology Project of State Grid Jiangxi Electric Power Company "Research on Configuration Principles and Coordinated Control Technology of Second and Third Defense Lines in Jiangxi Power Grid".

**Key words:** HVRT; DFIG; HVDC; synchronous condenser; coordinated control

## 0 引言

近年来, 风电总装机容量逐年增加, 但风电比

例的增大会使得原本交流电网的稳定性受到较大的影响, 系统总体稳定性及可控性也随之下落, 风电场大规模脱网事故逐渐增多<sup>[1]</sup>。因此, 为保证风电机组在故障期间具有保持联网继续运行的能力, 需要提高风电机组故障穿越能力。

根据风电并网导则, 当发生故障时风电机组应在一定的时间内保持并网连续运行, 以保持电网稳

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51577075); 国家电网江西省电力公司科技项目资助“江西电网二、三道防线的配置原则及协调控制技术研究”

定性和避免更大的经济损失。因此,包括低电压穿越和高电压穿越(High Voltage Ride Through, HVRT)在内的故障穿越问题受到越来越多的研究人员关注<sup>[2]</sup>。电压骤降故障下风电机组的低电压穿越技术已有分析<sup>[3]</sup>和较为详细的研究<sup>[4-7]</sup>,而风电机组的高电压穿越技术近些年来才逐渐被相关学者所关注。

一方面,风电场动态无功调节能力不足是导致风电场大规模脱网的重要原因,因此风机需具备一定的无功调节能力<sup>[8]</sup>。文献[9]通过双馈感应电机(DFIG)的等效电路推导了其无功平衡方程,并证明了DFIG具有灵活的无功调节能力。目前文献中已有一些关于风电机组高电压穿越技术的研究。一些文献在风机自身基础上增加控制策略及算法来提高DFIG的高电压穿越能力。文献[10]在传统撬棒电路的基础上进行改进,提出了一种撬棒电阻动态自适应的控制方法,且对于低电压穿越和高电压穿越均适用。文献[11]采取将DFIG定子侧串联电抗、直流侧增加卸荷电路、电网侧变流器(Grid-Side Converter, GSC)无功控制三种措施结合,提高DFIG风电系统高电压穿越能力。文献[12-14]则分别通过自适应调整电网侧变流器直流线路电压参考值、在无源阻尼保护的基础上计及定子磁链动态变化对功率外环影响、协调控制转子侧变流器(Rotor-Side Converter, RSC)和电网侧变流器的方法提高DFIG的高电压穿越能力。上述文献主要通过控制风机自身系统来提高风机高电压穿越能力,然而当电网发生严重电压骤升时,仅靠风机自身采用优化控制策略或算法并不能有效实现高电压穿越。

另一方面,在风电场出口侧部署动态无功补偿设备是提高严重故障时期风电机组HVRT能力的有效措施。文献[15]提出了使用同步调相机避免风电机组脱网的紧急控制策略,但将重点放在了紧急控制系统的配置方案而不是特定的HVRT策略。文献[16-18]分别采用超导磁储能装置、静止无功补偿装置(SVC)和静止无功发生器(SVG)与风电机组协调的方式来防止风电机组在故障时期脱网。文献[19]探讨了DFIG的GSC可控区域和无功出力极限,根据不同故障严重程度下不同电压水平,采取了不同的控制策略,主要由风机电网侧和转子侧变流器提供无功补偿,但在严重故障时期仅靠风机自身控制无法抑制过电压,需投入SVC和切除部分交流滤波器。文献[20]研究了通过风机自身及撬棒电路、斩波电路来增强风机的过电压能力,但在严重故障时电压上升的幅度仍超过了1.1 p.u.;加装静止同步补偿器(STATCOM)进行调整后,故障前后的电压水平

可以得到有效抑制,但在故障恢复暂态期间存在电压超调,并通过主动预测削弱了这一超调。目前比较常用的无功补偿设备主要有SVC, STATCOM和同步调相机。与SVC和STATCOM这类电力电子无功补偿装置相比,同步调相机因其可靠的大容量动态无功输出特性、提高系统短路容量以及抑制换相失败的能力,其在交直流系统中的应用受到了越来越多的关注。文献[21-22]基于调相机原理指出了调相机能够有效提高系统的静态电压稳定裕度,并探讨了调相机在特高压直流受端电网应用时有助于故障后的电压恢复,降低直流系统发生换相失败概率的效果。

虽然新型大容量调相机能够在一定程度上提升DFIG风电场的高电压穿越能力,但由于硬件设备的投入,投资成本会相应地增加。在故障暂态期间控制风机参与无功调节,能最大限度利用风电场无功调节能力,在一定程度上减少动态无功补偿装置(调相机等设备)的投资。在故障消除后或进入故障后稳态时,风机停止参与无功调节,便于系统恢复时期风机能够快速进入正常工作状态。利用DFIG和调相机在不同时间尺度下的无功协调,能实现不同故障严重程度下的高电压穿越,并减小故障期间的电压波动。

综上所述,为了实现交流电网严重故障下风电机组高电压穿越,本文建立了送端包含DFIG风电场和同步调相机的HVDC系统模型,分析了DFIG和同步调相机的无功输出特性,并在不同的控制策略下对比了不同故障严重程度下电压骤升期间风电场的并网点电压上升程度。仿真结果验证了该方案对提高DFIG风电场的高电压穿越能力的有效性,为双馈型风电场应对高电压穿越问题提供了一种可行方案。

## 1 风电场经高压直流并网系统及故障影响

### 1.1 风电经高压直流并网系统结构

大规模风电场经高压直流并网系统模型如图1所示,系统包括送端和受端交流电网、DFIG风电场、同步调相机以及交流滤波器。本文采用的高压直流模型是CIGRE的500 kV单极高压直流输电标准测试模型,直流额定功率为1 000 MW,送受端交流母线电压分别为345 kV和230 kV。

### 1.2 电压骤升的原因及影响

风电场端电压骤升的原因主要有:1)直流闭锁或突然投切大容量电容器组、大功率负载导致风电场端口无功过剩,导致电压骤升。高压直流输电系统的整流侧和逆变侧换流器在正常工作期间需要消

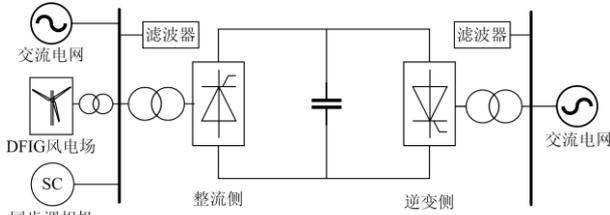


图1 风电经高压直流并网系统结构

Fig. 1 Diagram of wind power transmitted by HVDC system

耗大量无功, 由交流滤波器提供。系统发生如直流闭锁的严重故障时, 直流功率传输受阻, 换流器无功消耗显著降低, 交流滤波器无功来不及变化导致产生大量无功盈余, 从而抬高系统电压。2) 连续换相失败或当故障导致风电场端电压骤降时, 无功补偿设备的无功支撑速度不够(如无功电压的“错位补偿”效应<sup>[23]</sup>), 导致故障恢复期间风电场出口处出现短时间的电压升高。

风电机组电压升高程度较严重时, 若此时控制系统不切除 DFIG 风电机组, 由于 DFIG 的定子与电网直接相连, 风机端电压的骤升会导致 DFIG 定子和转子中磁链变化, 根据磁链守恒并且不能突变的原则, 定子和转子绕组中将出现直流暂态分量。在转子高速运转的过程中, 直流暂态分量会使得定子和转子绕组中的感应电压、电流升高, 故障较为严重时会超过电力电子器件和 DFIG 本身的安全限值, 从而造成设备损坏。此外, 暂态过程造成的电磁转矩波动还可能给 DFIG 机械结构和齿轮箱带来机械冲击, 减少风电机组的运行寿命。

## 2 DFIG 和调相机的无功控制

### 2.1 DFIG 的无功调节能力

DFIG 的背靠背直流变流器中, 控制系统的主要控制目标有两个: 1) 实现变速恒频前提下的最大风能追踪, 即对转速或有功的控制; 2) 实现对无功输出的控制, 保证并网的交流系统稳定性。其中, GSC 主要用于直流环节电压稳定控制并获得良好的交流输入性能; 转子侧变流器 (Rotor-Side Converter, RSC) 主要用于实现 DFIG 的运行控制, 即对 DFIG 的有功功率追踪和无功控制。GSC 常采用基于电网电压定向的矢量控制方式, RSC 采用基于定子磁链定向的矢量控制方式, 实现对输出有功和无功的解耦控制。

图 2 为基于 DFIG 的风电机组的结构及功率流向。  $P_w$  为输入风功率;  $P_s$  和  $Q_s$  为 DFIG 定子侧有功和无功输入;  $P_g$  和  $Q_g$  为双馈风机 GSC 的有功和无功输入;  $P_r$  和  $Q_r$  为 RSC 的有功和无功功率;  $P_t$

和  $Q_t$  为双馈发电机的总有功和无功功率;  $L_g$  和  $R_g$  为 GSC 的输入电感和电阻。

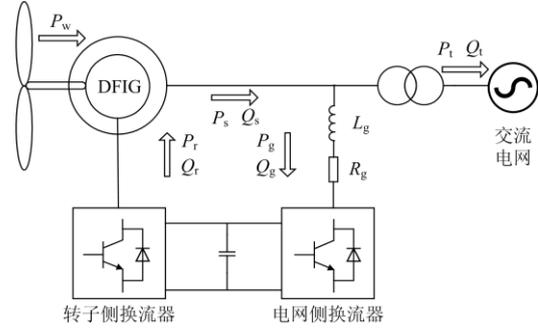


图2 双馈风机结构

Fig. 2 Structure of DFIG

DFIG 风电机组可以同时通过定子侧和 GSC 向电网提供无功功率, 因而为讨论 DFIG 风电机组的无功调节能力, 需要分别讨论定子侧和 GSC 的无功功率极限。

DFIG 定子侧无功调节能力受定、转子功率以及转子侧变流器的电流限制。但其中起关键作用的是转子侧变流器的电流限制。若给定定子有功功率时, 定子的无功调节极限<sup>[24]</sup>为

$$\begin{cases} Q_{s\_in\_max} = -\frac{3U_s^2}{2\omega_s L_s} - \sqrt{\left(\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} U_s I_{rmax}\right)^2 - P_s^2} \\ Q_{s\_out\_max} = -\frac{3U_s^2}{2\omega_s L_s} + \sqrt{\left(\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} U_s I_{rmax}\right)^2 - P_s^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $Q_{s\_in\_max}$ 、 $Q_{s\_out\_max}$  分别为考虑转子侧变流器电流限制时的 DFIG 定子侧吸收和发出的无功极限;  $U_s$  为电网电压;  $\omega_s$  为电网角频率;  $L_s$  为定子电感;  $L_m$  为激磁电感;  $I_{rmax}$  为转子侧变流器的电流最大值。可以看出, DFIG 定子侧的无功吸收能力大于其无功发出能力。

GSC 一般运行在单位功率因数模式, 即  $Q_g=0$ 。GSC 容量一般仅按照 DFIG 的最大转差有功功率设计, 因此其无功调节能力主要受变流器容量限制。GSC 的无功调节极限<sup>[23]</sup>为

$$\begin{cases} Q_{gsc\_in\_max} = -\sqrt{P_{gmax}^2 - s^2 P_s^2} \\ Q_{gsc\_out\_max} = \sqrt{P_{gmax}^2 - s^2 P_s^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $Q_{gsc\_in\_max}$ 、 $Q_{gsc\_out\_max}$  分别为考虑转子侧变流器电流限制时的 DFIG 定子侧吸收和发出的无功极限;  $P_{gmax}$  为变流器容量;  $s$  为转差率。

综合以上分析, DFIG 风电机组的无功吸收极限  $Q_{in\_max}$  和无功发出极限  $Q_{out\_max}$  为

$$\begin{cases} Q_{in\_max} = Q_{s\_in\_max} + Q_{gsc\_in\_max} \\ Q_{out\_max} = Q_{s\_out\_max} + Q_{gsc\_out\_max} \end{cases} \quad (3)$$

由于定子侧的无功吸收能力大于其无功发出能力,因而总体的 DFIG 无功吸收能力要大于系统无功发出能力。随着定子有功的增加,DFIG 的无功调节能力逐渐减小。

风电机组的 RSC 和 GSC 均可控制 DFIG 的无功输出。但由于利用 GSC 提供无功吸收时,会导致风机有功功率发生波动<sup>[25]</sup>,并且变流器容量一般为风机容量的 20%~30%,GSC 无功调节能力比定子无功调节能力小,导致定子无功调节能力大于电网侧变流器的无功调节能力,因此采用 RSC 控制定子无功的优先级比采用 GSC 无功调节优先级高。

## 2.2 调相机的无功控制

同步调相机本质上是不带机械负载的同步电动机,它利用同步电动机通过改变励磁可以调节功率因数的原理,作为一种专用的无功补偿装置并联于电网上运行。同步调相机所吸收的有功功率仅用于电机本身的损耗,因此它一般运行在接近于零电磁功率和零功率因数的工况下。同步调相机无功的调控与同步电动机类似,也是通过改变励磁电流的大小来调控,且正常工作状态下其无功输出与励磁电流成线性关系。

同步调相机的数学模型基本类似于同步电动机。其基本方程可写为<sup>[26]</sup>

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_s \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J}(-P_e - D\omega) \\ \frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{d0}}[-E'_q - (X_d - X'_d)i_d + E_{tq}] \end{cases} \quad (4)$$

以及满足

$$\begin{cases} E'_q = v_q + R_a i_q + X'_d i_d \\ 0 = v_d + R_a i_d - X_q i_q \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\omega$  为转子角速度;  $\omega_s$  为角速度的基准值;  $T_J$  为转子的惯性常数;  $P_e$  为电磁功率;  $D$  为阻尼系数;  $E'_q$  是暂态电动势;  $T'_{d0}$  为直轴暂态开路时间常数;  $X_d$  和  $X_q$  分别为直轴、交轴同步电抗;  $X'_d$  为直轴暂态电抗;  $E_{tq}$  为励磁电压;  $R_a$  为定子电阻;  $v_d$  和  $v_q$  分别为直轴、交轴电压分量;  $i_d$  和  $i_q$  分别为直轴、交轴电流分量。

新型大容量同步调相机一般采用静止自并励励

磁系统,其结构如图 3 所示。自动电压调节器(AVR)根据来自同步调相机端口的输入电压和电流来计算整流器的触发角,整流器根据所提供的触发角将机端交流电转换为直流电,为励磁绕组供电。

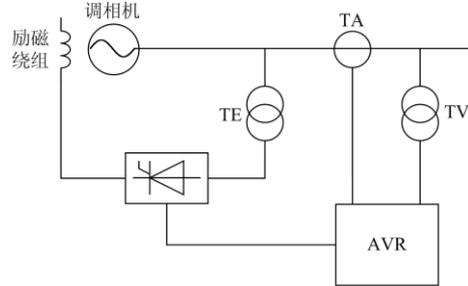


图 3 同步调相机结构

Fig. 3 Structure of synchronous condenser

交流系统发生接地故障后,一般会引起同步调相机机端电压下降,因此需要通过励磁绕组增加励磁来增加同步调相机机组的无功出力,以维持电压稳定。而故障后定子电流会随之增大,这增强了对励磁绕组的去磁作用,直到激磁和去磁形成一个新的平衡,调相机内电势  $E'_q$  达到一个新的稳态值。由式(4)可以看出,系统故障发生导致机端电压骤降后,调相机励磁系统能够很快地增加励磁电压,发出更多的无功,并且初始稳态运行点越高,提升到电压顶值的时间越短。相比而言,电容器组的无功输出特性则随着电压的骤降呈平方减少的关系。调相机的调节方式主要是通过改变其励磁电流来改变其发出或吸收的感性无功。当机端电压为定值时,其无功输出与励磁电流一般为线性关系。

然而,与诸如 SVC 和 STATCOM 等电力电子无功补偿设备相比,同步调相机的响应时间相对较长。仿真结果表明,当端电压骤升时,励磁电压仅在 40~60 ms 内就能达到稳态值,但由于励磁绕组的响应时间常数较大,励磁电流达到峰值则需要几百毫秒<sup>[27]</sup>,从而导致其无功响应也会较慢,如图 4 所示。

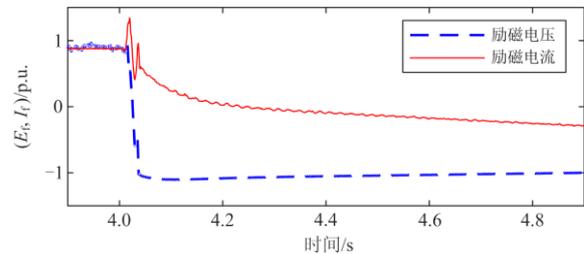


图 4 励磁电压与电流的响应时间区别

Fig. 4 Difference of response time of field voltage and current

### 3 高电压穿越协调控制策略

根据 2017 年国家能源局批准发布的《风电机组高电压穿越测试规程》，若风电场并网点电压为 0.9~1.1 p.u., 风机可以保持持续并网<sup>[28]</sup>。由于 DFIG 风电机组和同步调相机对故障电压的响应时间存在差异。考虑到风电机组的控制比送端母线交流滤波器快, 且外部无功补偿设备容量更大, 有必要采取相应风电机组和外部无功补偿设备的协调控制策略, 通过吸收故障时交流滤波器产生的盈余无功来

削弱电压骤升, 同时削弱故障暂态过电压, 保证故障情况下风电场不脱网。为此, 本文提出了如图 5 所示的 DFIG 风电场与同步调相机的协调控制策略, 以协调两者无功输出特性差异。该方案取 DFIG 风电场、调相机相连的交流母线电压作为故障检测电压, 调相机采取定端电压的控制方式, 在判断发生故障时, DFIG 风电场在故障暂态期间同时参与无功调节, 以弥补调相机暂态期间的慢速响应, 如图 6 所示。DFIG 无功调节量根据 RSC 和 GSC 各自无功极限在两者之间进行分配。

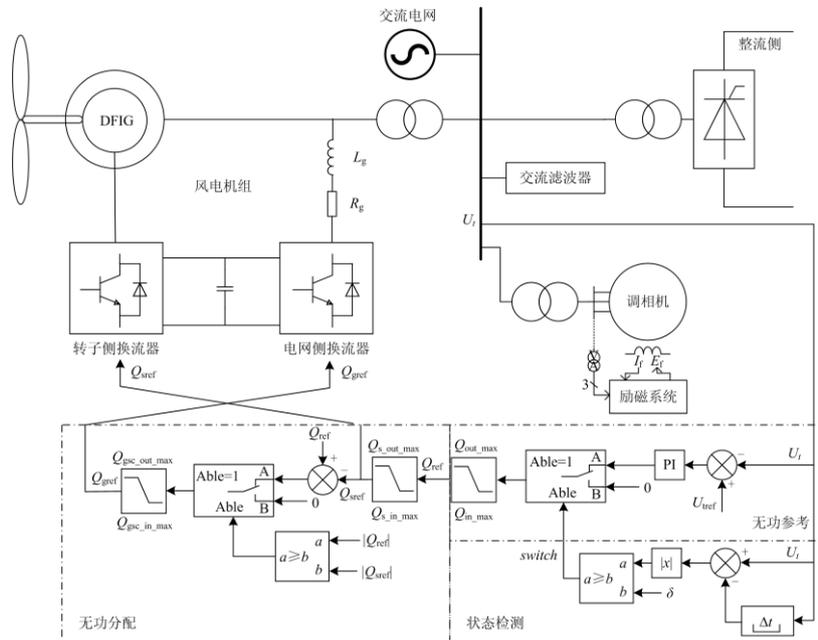


图 5 DFIG 风电场与调相机的协调控制示意图

Fig. 5 Diagram of coordinated control of DFIG wind farm and synchronous condenser

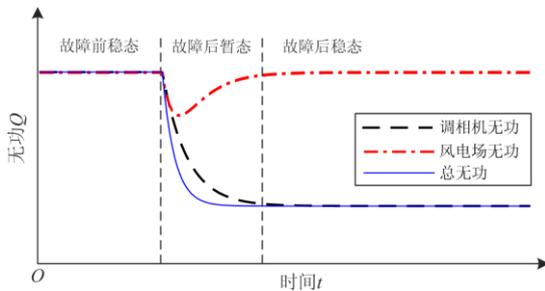


图 6 理想无功协调出力示意图

Fig. 6 Graph of ideal coordinated reactive power output

图 5 中状态检测部分是为了使 DFIG 仅在暂态期间提供无功调节, 在故障后稳态期间退出无功运行。其中,  $U_i$  为 DFIG 风电场所连接交流母线电压,  $U_{ref}$  为母线电压参考值,  $\delta$  表示设定的母线电压前后变化阈值, 以  $\Delta t$  时间内的母线电压变化值为电压变化率。该母线电压变化率主要是为了检测母

线电压的变化是否超过同步调相机的无功补偿响应速度。若超过调相机响应速度, 则调相机的无功补偿无法有效抑制母线电压的上升, 需控制风机参与无功补偿; 否则仅靠调相机就能有效应对母线电压变化。选择环节在判断母线电压在  $\Delta t=10\text{ms}$  前后的变化值超过  $\delta$  时将启动信号  $switch$  置 1, 将交流母线电压与参考值的误差经过一个 PI 环节后作为 DFIG 风电场的无功出力参考值, 使得 DFIG 风电机组参与无功调节, 从而在电网电压骤升后同步调相机未达到设定值时提供快速但有限的无功调节。若母线电压在  $\Delta t$  前后变化值未超过  $\delta$ , 则将  $switch$  置 0, DFIG 风电场不进行无功调节。

DFIG 风电场在进入无功补偿模式时, 还需考虑 RSC 和 GSC 的无功分配, 如图 6 中的无功分配环节所示。RSC 主要控制有功和无功, GSC 主要控制直流环节电压和机端电压/无功。图 5 中 DFIG 两

侧变流器无功分配逻辑是：优先采用 RSC 控制定子进行无功调节；当定子侧达到无功调节极限时，GSC 再投入进行无功调节；若两者均达到无功出力极限，则均按最大出力极限发无功。

根据上述分析可以得到 DFIG 风电场与调相机的协调控制流程如图 7 所示。若交流母线电压  $U_t$  在额定值 1 p.u. 附近，则调相机与风电场均不参与无功调节。否则，若  $U_t$  满足  $U_{t+\Delta t}-U_t > \delta(U_{t+\Delta t}$  为时刻  $t+\Delta t$  的交流母线电压， $\delta$  为设定的电压变化阈值)，即交流母线电压变化率较大，则在调相机参与无功调节的同时控制 DFIG 风电场进入无功补偿模式；若  $U_t$  满足  $U_{t+\Delta t}-U_t \leq \delta$ ，则仅需调相机的无功调节就可以跟踪电压变化，因而故障后稳态时期，DFIG 风机可以退出无功调节。

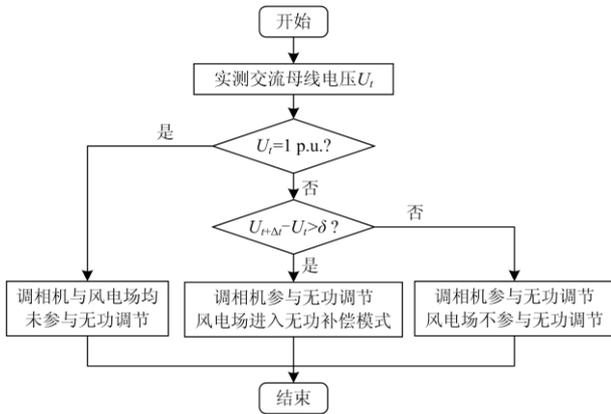


图 7 DFIG 风电场与调相机的高电压穿越协调控制流程图

Fig. 7 Flowchart of coordinated HVRT control of DFIG wind farm and synchronous condenser

## 4 仿真效果验证

### 4.1 仿真模型

本文中直流系统采用 CIGRE 单极直流标准测试模型，直流线路电压等级为  $\pm 500$  kV，额定传输功率为 1 000 MW。系统稳定运行时，直流系统整流侧滤波器提供无功大约为 670 Mvar，但故障时期滤波器提供的无功会随端电压变化而变化。直流送端投入四台调相机。直流系统结构如图 1 所示。

协调控制方法中状态检测环节的阈值  $\delta$  的选取与同步调相机的响应速度、调相机台数和系统容量有关。测试系统中直流送端投入了四台调相机，每台调相机额定容量为 300 Mvar，但调相机的进相吸收无功大约为额定容量的一半<sup>[29]</sup>，即 150 Mvar 左右，容量基准值为 1 000 MW，因此调相机能够吸收的无功大约为 0.6 p.u.。考虑到调相机无功输出从 0 到最大值的响应时间大约为 200~500 ms<sup>[27]</sup>，取动

态时的无功变化率为  $0.6 \text{ p.u.}/200 \text{ ms}=0.003 \text{ p.u./ms}$ 。由于此为平均响应速度，根据专家经验、调相机以及测试系统参数的反复试验，电压变化率阈值适当取小，因此取  $0.0015 \text{ p.u./ms}$ 。若  $\Delta t$  取 10 ms，则  $\delta$  取 0.015。

同步调相机采用静止自并励励磁方式，其控制目标为保持机端电压的相对稳定。调相机具体参数如表 1 所示。

表 1 同步调相机主要参数

Table 1 Main parameters of the synchronous condenser

参数	数值
额定容量	300 Mvar
额定电压	20 kV
额定电流	8.66 kA
直轴同步电抗 $X_d$	1.505 p.u.
交轴同步电抗 $X_q$	1.56 p.u.
直轴暂态电抗 $X'_d$	0.14 p.u.
交轴暂态电抗 $X'_q$	0.228 p.u.
直轴次暂态电抗 $X''_d$	0.113 p.u.
交轴次暂态电抗 $X''_q$	0.12 p.u.
直轴开路暂态时间常数 $T'_{d0}$	8.807 s
交轴开路暂态时间常数 $T'_{q0}$	0.85 s
直轴开路次暂态时间常数 $T''_{d0}$	0.042 s
交轴开路次暂态时间常数 $T''_{q0}$	0.05 s
定子电阻 $R_s$	0.000 95 p.u.
定子漏抗 $X_L$	0.1 p.u.
气隙系数	1.0

DFIG 风电场采用等效风电场模型，总容量为 500 MW，单台风机的参数如表 2 所示。

表 2 DFIG 主要参数

Table 2 Main parameters of DFIG

参数	数值	参数	数值
额定功率	1.5 MW	转子电阻	0.005 33 p.u.
定子电压	690 V	定子漏感	0.142 5 p.u.
频率	50 Hz	转子漏感	0.142 5 p.u.
定转子转速比	0.335	激磁电感	2.176 7 p.u.
定子电阻	0.007 56 p.u.	极对数	2

### 4.2 算例分析

分别对直流线路发生闭锁、整流侧无功小幅度骤增、直流受端发生连续换相失败条件下的协调控制策略效果进行分析。

情形一：设置  $t=5 \text{ s}$  时直流线路发生闭锁故障，直流送端电压迅速上升至 1.35 p.u.，远高于允许运行的范围。直流线路闭锁后，直流线路电流和送端向交流母线传输的有功功率均降为零，原有交流滤波器所提供的无功功率在送端交流母线处出现了大量盈余。无功在交流母线处的积累，也使得交流母线电压被抬高。

文献[14]在风机端电压骤升至 1.1 p.u. 以上时控制电网侧变流器输出与电压骤升幅度相匹配的无功电流, 实现母线电压的稳定, 同时优化转子侧变流器有功和无功设定, 向电网提供无功支持。若不增加文献[14]中的直流卸荷电路, 考虑仅靠风机自身无功补偿, 以直流闭锁故障为例, 采用文献[14]的方法仅风机提供无功时的风电场端电压为 1.14 p.u. 左右, 仍然无法达到高电压穿越要求, 如图 8(a)蓝色点画线所示。此时的风电场无功输出如图 8(b)蓝色点画线所示, 风机达到了无功输出极限。

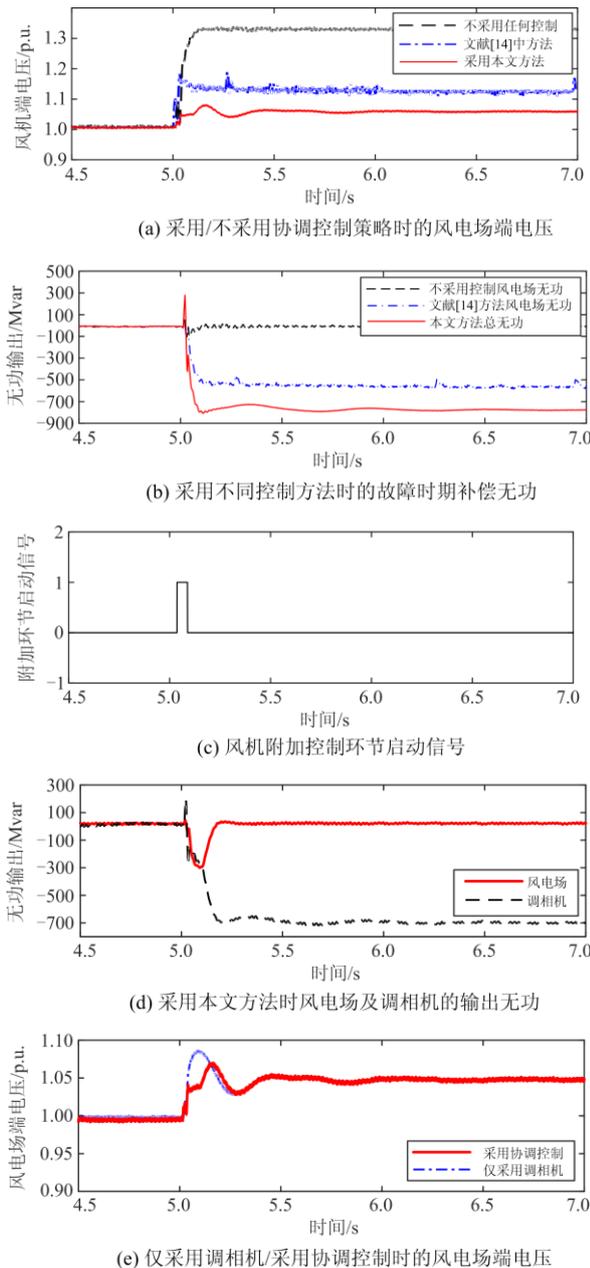


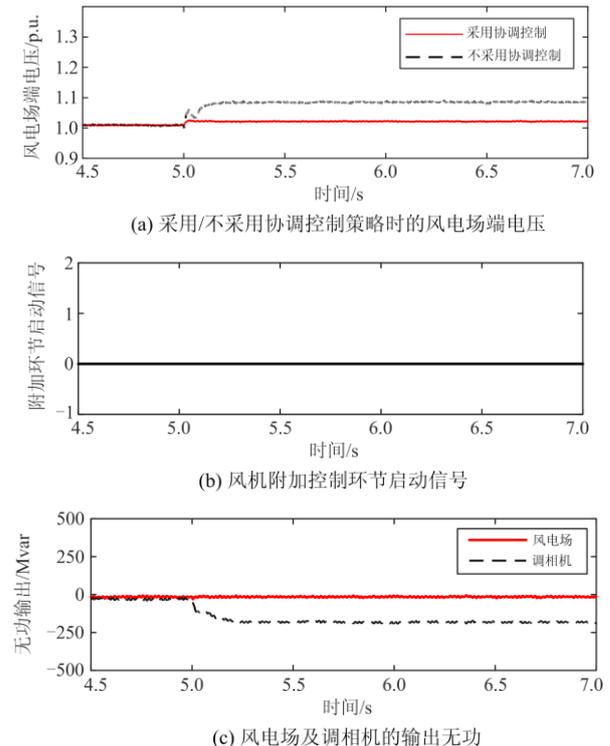
图 8 直流闭锁前后系统运行状况

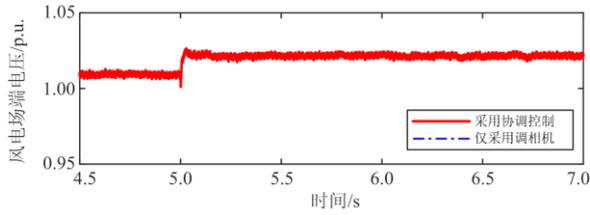
Fig. 8 System parameters before/after DC-link blocked

采用调相机与风机的协调控制方法, 在发生直流闭锁时, 采用调相机作为主要无功吸收装置, 其具有很强的过载能力, 同时状态检测环节能够检测到风电场端电压发生突变并产生如图 8(c)所示的启动信号, 控制风机紧急提供部分无功支撑, 能进一步降低端电压超调并且稳态电压值大约为 1.05 p.u., 如图 8(a)所示。故障时风电场和调相机的输出无功如图 8(d)所示, 两者总无功如图 8(b)红色实线所示。图 8(e)为采用协调控制和仅采用调相机进行补偿时的风电场端电压。仿真结果表明, 采用协调控制策略后, 直流闭锁发生时调相机检测到端电压升高而开始吸收无功, 同时故障暂态期间风机的改进无功控制环节启动使得 DFIG 也参与无功吸收, 从而大幅降低端电压上升程度。故障后稳态时, 风机不再参与无功调节。

情形二: 设置  $t=5$  s 时整流侧骤增 200 Mvar 无功, 导致整流侧电压升高, 风电场的端电压将在短时间内小幅升高。

采用调相机与风机的协调控制方法, 如图 9(b)所示在发生送端无功骤增时, 风电场端电压上升较小, 并不足以使得风机改进无功控制环节产生启动信号。因而此时仅有调相机吸收部分无功, 端电压维持在 1.02 p.u.附近, 如图 9(a)所示。图 9(c)为故障时风电场和调相机的输出无功。图 9(d)表示了风机改进无功控制环节在无功骤增幅度不大时风机附加控制环节并未投入运行, 因而波形并无区别。

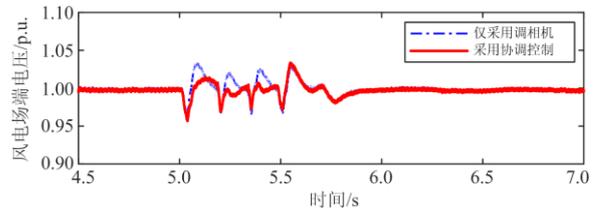




(d) 仅采用调相机/采用协调控制时的风电场端电压

图 9 送端无功小幅骤升前后的系统运行状况

Fig. 9 System parameters before/after a small redundancy of reactive power occurs



(d) 仅采用调相机/采用协调控制时的风电场端电压

图 10 连续换相失败前后的系统运行状况

Fig. 10 System parameters before/after continuous commutation failure

情形三：设置  $t=5\text{ s}$  时距逆变侧交流母线电气距离  $0.5\text{ H}$  处发生单相短路接地故障，系统发生连续换相失败，导致直流线路出现较长时间的功率周期性受阻和恢复，因而直流送端将会出现多次周期性低电压和过电压，送端的风电机组反复进入低电压穿越和高电压穿越阶段，且故障持续时间较长。

采用调相机与风机的协调控制方法，在直流受端连续换相失败故障发生时，该方法能够检测到风电场端电压发生突变并产生如图 10(b)所示的启动信号，控制风机紧急提供部分无功支撑，能够削减端电压峰值至大约  $1.02\text{ p.u.}$ ，如图 10(a)所示。图 10(c)为故障时风电场和调相机的输出无功，图 10(d)为采用不同方法时的风电场端电压。可以看到由于调相机无功响应时间较长，调相机的无功输出并不能很

好地跟随端电压的快速变化，此时风机参与无功调节有利于抑制电压骤升。仿真结果表明，系统发生连续换相失败时本文所提出的协调控制策略能够较好地弥补调相机无功响应速度较慢的问题。

### 5 结论

本文在分析了 DFIG 和调相机的无功出力特性的基础上，提出了调相机与 DFIG 协调控制方法，以增强 DFIG 风电场的高电压穿越能力。仿真结果表明：

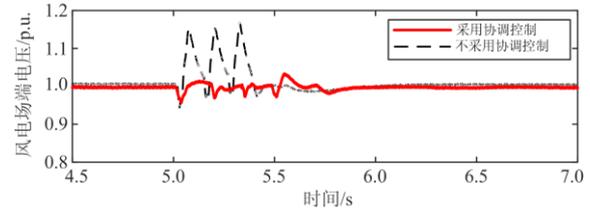
- 1) 在送端包含风电机组的高压直流输电系统中，若发生直流闭锁等严重故障使得风电场端电压升高，采用调相机与 DFIG 改进无功控制环节协调控制可以有效削弱风电场端电压骤升程度；
- 2) 若发生小部分无功骤升，协调控制策略仅通过调相机吸收无功就可以维持端电压在较低水平，风机可以不参与无功调节；
- 3) 若直流受端发生连续换相失败，采用协调控制策略可以有效削弱端电压振荡时期的峰值。

### 参考文献

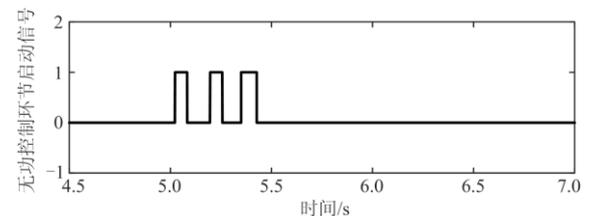
[1] 廖惠琴. 并网风电场的无功补偿技术及其对连锁脱网事故的影响分析[D]. 天津: 天津大学, 2017.  
LIAO Huiqin. Reactive power compensation technology of grid-connected wind farms and analysis on the cascading trip-off events[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.

[2] 艾斯卡尔, 朱永利, 唐斌伟. 风力发电机组故障穿越问题综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 147-153.  
AISIKAER, ZHU Yongli, TANG Binwei. Summarizing for fault ride through characteristics of wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 147-153.

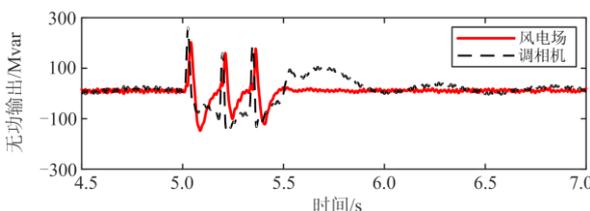
[3] 向昌明, 范立新, 蒋一泉, 等. 风电场内风电机组连锁脱网机理与低电压穿越能力研究[J]. 电力自动化设备,



(a) 采用/不采用协调控制策略时的风电场端电压



(b) 风机附加控制环节启动信号



(c) 风电场及调相机的输出无功

- 2013, 33(12): 91-97.
- XIANG Changming, FAN Lixin, JIANG Yiquan, et al. Analysis of cascading trip-off mechanism and low voltage ride through capability of wind farm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(12): 91-97.
- [4] ZHU Rongwu, CHEN Zhe, WU Xiaojie, et al. Virtual damping flux-based LVRT control for DFIG-based wind turbine[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2015, 30(2): 714-725.
- [5] ZOU Zhice, LIAO Jucheng, LEI Yi, et al. Postfault LVRT performance enhancement of DFIG using a stage-controlled SSFCL-RSDR[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2019, 29(2): 1-6.
- [6] NOURELDEEN O, HAMDAN I. A novel controllable crowbar based on fault type protection technique for DFIG wind energy conversion system using adaptive neuro-fuzzy inference system[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(4): 328-339. DOI: 10.1186/s41601-018-0106-0.
- [7] 孙丽玲, 房丹. 定子匝间故障的双馈风力发电机组的建模与低电压穿越分析[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(11): 82-87.
- SUN Liling, FANG Dan. Modeling and low-voltage ride-through analysis for DFIG with SWITSC[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(11): 82-87.
- [8] 李岚. 双馈电机控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [9] 刘其辉, 王志明. 双馈式变速恒频风力发电机的无功功率机制及特性研究[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(3): 82-89.
- LIU Qihui, WANG Zhiming. Reactive power generation mechanism & characteristic of doubly fed variable speed constant frequency wind power generator[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(3): 82-89.
- [10] 李生民, 贾铎, 肖亚敏. 采用新型动态撬棒的双馈低电压连锁故障穿越技术研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(14): 79-86.
- LI Shengmin, JIA Duo, XIAO Yamin. Low-high voltage chain fault ride-through technology of DFIG with active crowbar[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(14): 79-86.
- [11] 张谦, 蒋永梅, 丁敏, 等. 双馈风电机组高电压穿越协调控制策略[J]. *浙江电力*, 2019, 38(2): 57-61.
- ZHANG Qian, JIANG Yongmei, DING Min, et al. A coordinated control strategy for high voltage ride-through of doubly-fed induction generator[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2019, 38(2): 57-61.
- [12] ZHENG Zhong, YANG Geng, GENG Hua. High voltage ride-through control strategy of grid-side converter for DFIG-based WECS[C] // *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, November 10-13, 2013, Vienna, Austria: 5282-5287.
- [13] 孙丽玲, 王艳娟, 许伯强. DFIG 高电压穿越暂态特性分析及控制策略改进[J]. *电机与控制学报*, 2019, 23(2): 27-34.
- SUN Liling, WANG Yanjuan, XU Boqiang. Transient analysis and control strategy improvement of high voltage ride through of DFIG[J]. *Electric Machines and Control*, 2019, 23(2): 27-34.
- [14] 徐海亮, 章玮, 陈建生, 等. 考虑动态无功支持的双馈风电机组高电压穿越控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(36): 112-119, 16.
- XU Hailiang, ZHANG Wei, CHEN Jiansheng, et al. A high-voltage ride-through control strategy for DFIG based wind turbines considering dynamic reactive power support[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(36): 112-119, 16.
- [15] HUANG Hui, WU Xuelian, HUO Chao, et al. Research on emergency control strategy of synchronous condenser for inhibiting wind turbine tripping in sending-end network[C] // *2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, November 6-8, 2018, Guangzhou, China: 2672-2677.
- [16] YUNUS A M S, ABU-SIADA A, MASOUM M A S. Application of SMES unit to improve the high-voltage-ride-through capability of DFIG-grid connected during voltage swell[C] // *2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, November 13-16, 2011, Perth, Australia: 1-6.
- [17] 吕清洁, 徐政, 李晖, 等. 动态无功补偿对风电场暂态电压的影响及控制策略[J]. *电力建设*, 2015, 36(8): 122-129.
- LÜ Qingjie, XU Zheng, LI Hui, et al. Effects of dynamic reactive power compensation on wind farm transient voltage and its control strategy research[J]. *Electric Power Construction*, 2015, 36(8): 122-129.
- [18] ZHANG Yuandong, LI Qing, ZHANG Jinping, et al. Wind farm HVRT capability improvement based on coordinated reactive power control strategy[J]. *The Journal of Engineering*, 2017, 13: 756-761.
- [19] 韩平平, 张海天, 丁明, 等. 大规模高压直流输电系统闭锁故障下送端风电场高电压穿越的控制策略[J]. *电网技术*, 2018, 42(4): 1086-1095.
- HAN Pingping, ZHANG Haitian, DING Ming, et al. A coordinated HVRT strategy of large-scale wind power transmitted by HVDC system[J]. *Power System Technology*,

- 2018, 42(4): 1086-1095.
- [20] 侯文昭. 基于双馈风力发电机的风电系统高电压脱网问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.  
HOU Wenzhao. Study of high voltage off-grid problem of wind power system based on DFIG[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [21] 常海军, 霍超, 刘福锁, 等. 提高弱送端电网暂态电压稳定水平的调相机优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 90-95.  
CHANG Haijun, CUI Chao, LIU Fusuo, et al. Research on optimal allocation method of synchronous condensers for improving transient voltage stability level of weak sending-end power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 90-95.
- [22] 王雅婷, 张一驰, 周勤勇, 等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 22-28.  
WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 22-28.
- [23] 郑超. SVC 错位补偿对风机高电压脱网威胁及应对措施[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2750-2757.  
ZHENG Chao. Study on threat of wind turbine tripping due to overvoltage caused by SVC malposition compensation and countermeasures[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2750-2757.
- [24] 郎永强, 张学广, 徐殿国, 等. 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 77-82.  
LANG Yongqiang, ZHANG Xueguang, XU Dianguo, et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 77-82.
- [25] 王松, 李庚银, 周明. 双馈风力发电机组无功调节机理及无功控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2714-2720.  
WANG Song, LI Gengyin, ZHOU Ming. The reactive power adjusting mechanism & control strategy of doubly fed induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2714-2720.
- [26] 刘建勋, 陆榛, 付俊波, 等. 抵御直流连续换相失败的同步调相机配置研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(12): 22-27.  
LIU Jianxun, LU Zhen, FU Junbo, et al. Research on synchronous condenser configuration for resisting continuous commutation failure in HVDC[J]. Smart Power, 2017, 45(12): 22-27.
- [27] 金一丁, 于钊, 李明节, 等. 新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2095-2102.  
JIN Yiding, YU Zhao, LI Mingjie, et al. Comparison of new generation synchronous condenser and power electronic reactive-power compensation devices in application in UHV DC/AC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2095-2102.
- [28] 国家能源局. 风电机组高电压穿越测试规程: NB/T 31111—2017[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.  
National Energy Administration. Test procedure of wind turbine high voltage ride through capability: NB/T 31111—2017[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- [29] 张开宇, 崔勇, 庄侃沁, 等. 加装同步调相机对多直流馈入受端电网的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 139-143.  
ZHANG Kaiyu, CUI Yong, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis of the influence of synchronous condensers on receiving-end grid with multi-infeed HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 139-143.

收稿日期: 2019-11-04; 修回日期: 2020-02-05

作者简介:

詹锦(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特高压直流系统稳定控制; E-mail: jin\_zhan@hust.edu.cn

陈波(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与发电机励磁系统等; E-mail: orchis1986@126.com

姚伟(1983—), 男, 通信作者, 副教授, 博士生导师, 研究方向为大电网稳定性分析与控制、柔性直流输电系统及其控制等。E-mail: w.yao@hust.edu.cn

(编辑 周金梅)