

# 基于 LADRC 的双馈风机与 SVG 协调控制的 并网系统研究

郭驰岳 刘毅力 葛峻辰

(西安工程大学电子信息学院 西安 710048)

**摘要:**为了解决双馈风机(doubly fed induction generator,DFIG)在并网或运行时给电网带来的稳定性问题,提出了静止无功发生器(static var generator,SVG)与 DFIG 协同补偿无功的方法,并在此基础上通过线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control,LADRC)代替传统的 PI 控制来控制变流器,以及加装超级电容储能对 DFIG 的变流器直流侧控制进行优化。最后结合风电场的实际情况,在 MATLAB 中搭建了使用 LADRC 的含超级电容的双馈风机并网模型,并对其并网时的交直流波动以及无功功率的传输进行了仿真分析,实验结果验证了该控制策略可以提高双馈风机稳定运行的能力,解决功率波动时变流器交直流侧功率不平衡的问题,与 SVG 的协同控制策略可以提高系统的低电压穿越能力,提高了整个风力发电系统的稳定性。

**关键词:**双馈风力发电机;SVG;线性自抗扰控制;超级电容

**中图分类号:** TM351;TP273;TN761 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4011

## Research on grid-connected system with coordinated control of doubly-fed induction generator and SVG based on LADRC

Guo Chiyue Liu Yili Ge Junchen

(School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** To address the stability issues caused by doubly fed induction generator (DFIG) during grid connection or operation, this paper proposes a coordinated reactive power compensation method utilizing static var generator (SVG) in conjunction with DFIG. Furthermore, the traditional PI control for converters is replaced with linear active disturbance rejection control (LADRC), and supercapacitors are installed to optimize the DC-side control of DFIG converters. Finally, based on the actual conditions of wind farms, a grid-connected DFIG model integrated with supercapacitors and utilizing LADRC is established in MATLAB. A simulation analysis is conducted on the AC-DC fluctuations and reactive power transmission during grid connection. The experimental results verify that this control strategy can enhance the stable operation of DFIG, resolve the issue of AC-DC side power imbalance in converters during power fluctuations, and the coordinated control strategy with SVG can improve the system's low-voltage ride-through capability, thereby enhancing the overall stability of the wind power generation system.

**Keywords:** doubly fed induction generator; static var generator; active disturbance rejection control; supercapacitor

### 0 引言

当今风电作为低污染、高效能一种发电形式,已然变成新能源发电系统重不可或缺的一部分,而双馈风机因其较为稳定的运行模式成为风电场中的热门机型<sup>[1]</sup>。但是由于风力的不确定性以及风机装机容量的不断增大,其并

网时会对电网产生稳定性问题。为了让双馈风电场并网后正常运行,提高电能质量及系统稳定性,电压的稳定性问题必须解决<sup>[2]</sup>。

为了解决稳定性问题,无功补偿是必不可少的。根据国家对于风电场无功补偿和电力管理有关的规定,关于风电场并网的主要要求如下:1)风电场中的无功调节模式,一

一般是恒电压调节、恒功率因数调节和恒无功功率调节<sup>[3]</sup>等,均具有按照系统工作要求在线转换模式的能力,风电机组在应实现功率因数从0.95(超前)到0.95(滞后)的工作区域内动态可调<sup>[4]</sup>;2)在故障发生后,风电机组必须严格按照相关标准持续运行0.625 s,并且向电网提供无功电流,使电网能够平稳过渡到正常运行状态<sup>[5-6]</sup>。

近年来国内外学者针对双馈风机的无功补偿以及变流器的控制问题提出了众多优化方法。文献[7]提出了对风机的功率因数加以限制的情况下优先静止无功发生器(static var generator,SVG)补偿无功,且无功出力遵循等功率因数分配,但未具体说明各自应当出力多少。文献[8]通过控制SVG与双馈风机(doubly fed induction generator,DFIG)协同有序地动作从而实现对电压的支撑储能型双馈风电场联合STATCOM的无功协调控制:提出了改进型DFIG超级电容储能系统,并与STATCOM间的协调控制进行了研究,但未改进DFIG两侧变流器的控制策略。文献[9]使用储能型DFIG联合SVG共同对并网电压进行无功支撑,对比了动态和静态状况下不同的控制方法,未具体进行仿真验证。文献[10]基于功率关系,重点研究了双馈风电机组网侧变换器的无功输出能力,确定系统动态无功极限为定子和网侧变换器无功极限之和。上述文献虽已经提及无功补偿对系统的必要性,未具体验证SVG与DFIG联动后对系统的影响,也未解决直流侧能量不匹配而引发的波动问题。

综上,本文将含线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control,LADRC)的新型DFIG控制策略与SVG进行联动,通过LADRC控制<sup>[11]</sup>的方式代替传统的PI控制策略<sup>[12]</sup>,以来减轻系统的振荡,减小DFIG直流侧波动,提高逆变器的响应速度,使得并网时无功补偿效率增加,进一步提升整个风力系统控制精度与通用性。

## 1 双馈风力发电系统模型

### 1.1 双馈风力发电系统结构模型

由于风力波动特性,当今变速恒频发电模式为主流选择<sup>[13]</sup>。双馈风力发电通过适当调节转子的励磁电压,可以实现发电机定子输出电压与电网电压的同步<sup>[14]</sup>。双馈风机的运行基本结构如图1所示。

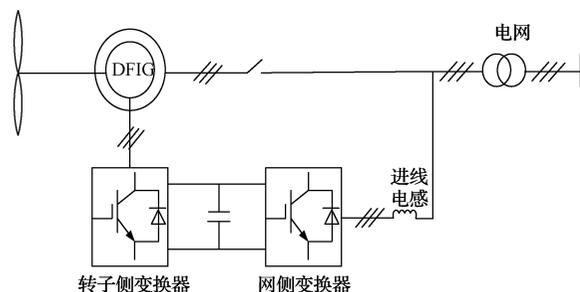


图1 双馈风力发电机基本结构

Fig.1 Schematic diagram of doubly fed wind turbine generator

图1为双馈风力发电系统内部结构以及变速恒频运转的基本原理。可以看到由变流器和DFIG等主要元器件所组成的双馈式感应发电机控制系统,其转子与电网之间由双PWM变流器进行连接,而定子则直接与电网连接<sup>[15]</sup>。这时候需要经过变流器,对电机传输出去的电流、频率和相位等做出必要的转换,当满足并网的条件时方可给电网正常供电,因此变流器对风力发电系统的稳定并网来说相当关键。

### 1.2 双馈风力发电机数学模型

对双馈风力发电机的三相绕组进行电流计算时,双馈风力发电机的等效物理模式如图2所示。

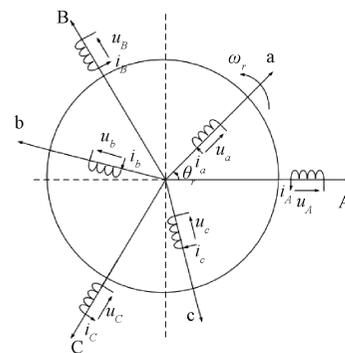


图2 双馈发电机物理模型

Fig.2 Physical model of doubly fed generator

利用坐标变换的方式对其加以研究。大体策略是先将静止三相坐标系与静止两相坐标系之间的变换,然后再转换到两相旋转坐标系下得出。

电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} -\Psi_{ds} \\ -\Psi_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_1 \Psi_{qs} \\ -\omega_1 \Psi_{ds} \\ -\omega_2 \Psi_{qr} \\ \omega_2 \Psi_{dr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $u_{ds}$ 、 $u_{qs}$ 为定子电压的d、q轴分量; $u_{dr}$ 、 $u_{qr}$ 为转子电压的d、q轴分量。

磁链方程为:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\Psi_{ds}$ 、 $\Psi_{qs}$ 为定子磁链的d、q轴分量; $\Psi_{dr}$ 、 $\Psi_{qr}$ 为转子磁链的d、q轴分量; $L_m = 1.5L_{ms}$ ,为定、转子绕组间的等效互感; $L_s = L_{ls} + 1.5L_{ms}$ ,为定子绕组的自感; $L_r = L_{lr} + 1.5L_{mr}$ ,为转子绕组的自感。

进行坐标变换可以在分析 DFIG 时进行适当的简化<sup>[16]</sup>。

### 1.3 双馈风力发电机变流器控制

变流器的结构是由网侧换流器 GCS、转子侧换流器 RCS 与经双向 DC-DC 连接的超级电容构成<sup>[17]</sup>。在 DFIG 运行过程中,变流器还需和 SVG 配合协调控制,且超级电容经双向 DC-DC 变换器与直流侧相连,所处位置如图 3 所示。

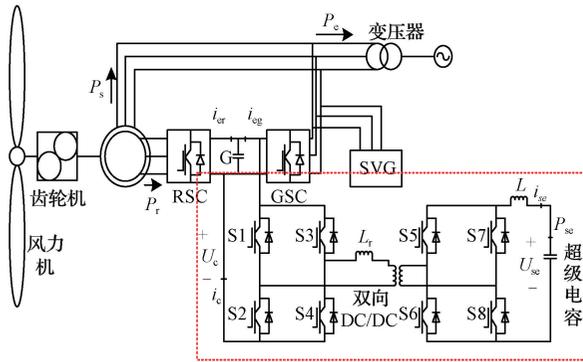


图 3 含 SVG 的 DFIG 并网结构

Fig. 3 DFIG grid connection structure diagram with SVG

#### 1) 网侧变流器控制

单独对  $d$ 、 $q$  轴电流  $i_d$ 、 $i_q$  作负反馈并不能消除电流耦合,必须利用状态反馈来实现,且变流器侧各物理量均为时变交流量,不利于控制系统的设计。根据瞬时功率理论得到定子侧电  $U_s$  与电流  $I_s$  解耦公式如下:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(U_{sd}I_{sd} + U_{sq}I_{sq}) = \frac{3}{2}U_{sd}I_{sd} \\ Q = \frac{3}{2}(U_{sq}I_{sd} - U_{sd}I_{sq}) = -\frac{3}{2}U_{sd}I_{sq} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)表明  $d$  轴和  $q$  轴电流之间存在相互耦合,会给控制带来不利的影响,因此有必要引入前馈解耦系数  $K_p$ 、 $K_i$ 。

对式(3)进行拉氏变换得:

$$\begin{bmatrix} U_{cd} \\ U_{cq} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_s + R\omega L \\ \omega L L_s + R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{sq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{cases} U_{cd} = -\left(K_{ps} + \frac{K_{is}}{s}\right)(I_{sdref} - I_{sd}) + \omega L I_{sq} + U_{sd} \\ U_{cq} = -\left(K_{ps} + \frac{K_{is}}{s}\right)(I_{sqref} - I_{sq}) + \omega L I_{sq} + U_{sq} \end{cases} \quad (5)$$

综合式(4)、(5)得:

$$\begin{cases} \left(K_{ps} + \frac{K_{is}}{s}\right)(I_{sdref} - I_{sd}) = (L_s + R)I_{sd} \\ \left(K_{ps} + \frac{K_{is}}{s}\right)(I_{sqref} - I_{sq}) = (L_s + R)I_{sq} \end{cases} \quad (6)$$

对于内环电流控制器来说:考虑到系统对准确性和动态性能的要求,在所有外环控制器中都加入了 PI 环节。

控制定子侧参考电流  $I_{sdref}$  和  $I_{sqref}$  分别对应换流器有功功率和无功功率的控制。

对于内环电流控制器来说,当变流器交直流两侧功率不平衡时会引起直流电压波动,因此采用超级电容吸收不平衡电流解决直流侧能量不匹配的问题,并且在故障时可以释放能量来使系统快速恢复稳定状态。

#### 2) 机侧变流器控制

同理于网侧变换器数学模型,将  $q$  轴定位在定子电压空间矢量上,转子侧电感为  $L_r$ ,定子侧电感为  $L_s$ ,基于瞬时功率理论并结合公式,经 Park 变换及功率变换后得:

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3L_m}{2L_s}u_{sp}i_{rq} \\ Q_s = \frac{3u_s^2}{2\omega_s L_s} - \frac{3L_m}{2L_s}u_{sp}i_{rq} \end{cases} \quad (7)$$

转子侧电压方程式为:

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} - \omega_r \Psi_{rq} + \frac{d}{dt} \Psi_{rd} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} - \omega_r \Psi_{rd} + \frac{d}{dt} \Psi_{rq} \end{cases} \quad (8)$$

转子侧磁链为:

$$\begin{cases} \Psi_{rd} = (L_r - L_m^2/L_s)i_{rd} + \frac{L_m}{L_s}\Psi_{sd} = \sigma L_r i_{rd} + \frac{L_m}{L_s}\Psi_{sd} \\ \Psi_{rq} = (L_r - L_m^2/L_s)i_{rq} = \sigma L_r i_{rq} \end{cases} \quad (9)$$

式中:漏电感系数  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$ 。

将转子侧磁链方程带入电压方程得:

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} - \omega_r \sigma L_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} \Psi_{sd} \\ u_{rq} = R_r i_{rd} + \omega_r \sigma L_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rq} + \frac{\omega_r L_m}{L_s} \frac{d}{dt} \Psi_{sd} \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)经拉氏变换得到:

$$\begin{bmatrix} U_{rd} \\ U_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r + s\sigma L_r - \omega_r \sigma L_r \\ \omega_r \sigma L_r R_r + s\sigma L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega_r L_m}{L_s} \Psi_{sd} \end{bmatrix} \quad (11)$$

从式(11)可以看出,在定子电压定向的条件下,可以通过控制  $dq$  轴上的转子电流控制 DFIG 的功率变化,由此对转子电流的控制转化为对转子的电压控制,这样通过这种方法实现对定子侧的有功和无功的内环控制,但在随机性强的风电系统中传统的 PI 控制无法避免次同步振荡。

传统 PI 控制下机侧和网侧综合控制策略如图 4 所示。本文采用 LADRC 替换 RSC 传统双环 PI 的有功内环节。即将图 4 的 PI 控制环节变为 LADRC 环节。实际应用中,LADRC 为了对系统的扰动进行补偿,所以选取应比控制系统高一阶,故构造 3 阶线性扩张状态观测器

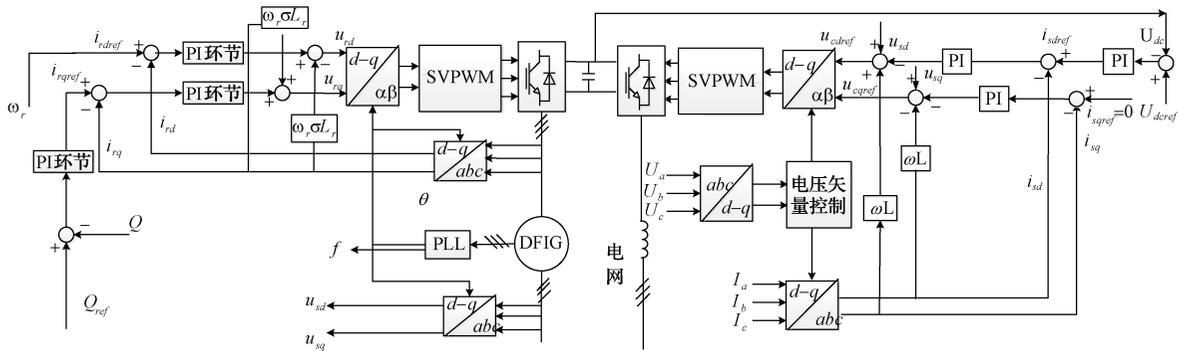


图4 外环和内环综合控制策略

Fig. 4 Integrated control strategy for outer and inner loops

(linear ESO, LESO) 和比例与 2 阶微分反馈控制律, 实时补偿次同步扰动量。

在本文中, 采用了一种新颖的控制策略——LADRC, 以替代传统 RSC 双环 PI 控制中的有功内环节。具体而言, 就是将原有的 PI 控制环节更新为 LADRC 环节, 以应对系统性能的新要求。在实际应用中, 由于 LADRC 的设计目标是实现对系统扰动的精确补偿, 因此, 构建了一个三阶线性扩张状态观测器 (LESO)。这个 LESO 的阶数选择高于控制系统, 以确保能够更准确地观测和补偿系统中的扰动。并且结合比例与二阶微分反馈控制律, 实现了对次同步扰动量的实时补偿, 从而提高了系统的稳定性和响应速度。

其中对  $n$  阶系统 LADRC 的结构框图如图 5 所示。

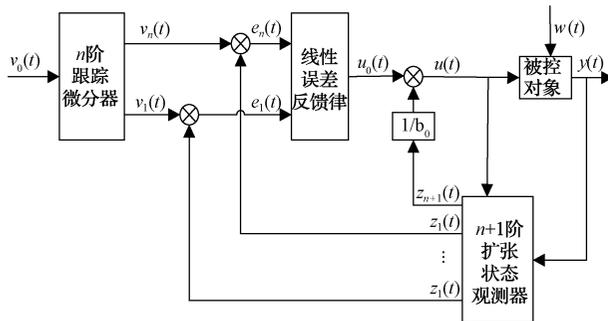


图5  $n$  阶系统 LADRC 的结构框图

Fig. 5 Structural diagram of LADRC for  $n$ -order system

将该 LADRC 与 PI 控制环节进行替换, 形成新的控制环节, 从而降低次同步振荡对本次仿真验证结果的影响。

## 2 无功补偿装置控制原理

由于 DFIG 可以发出无功功率, 但是过量无功的发出会影响其有功功率的传输。并且仅靠 DFIG 可能不能满足低电压穿越要求, 这时就需要无功补偿装置的介入<sup>[18]</sup>。风电场无功补偿装置可采用静止无功补偿器或 SVG。但由于 DFIG 特性, 应使用能够调节无功的无功补偿器。本

文以 SVG 为补偿器件对整个系统进行补偿。

### 2.1 SVG 控制系统

SVG 大多数都通过逆变器接入电网<sup>[19]</sup>, 其主要控制流程如图 6 所示。

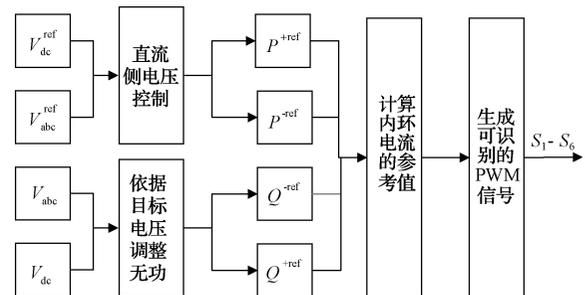


图6 SVG 控制系统

Fig. 6 SVG control system

交流系统任一点  $o$  的正负序电压可表示为:

$$v_o = v_o^+ + v_o^- =$$

$$\begin{bmatrix} V_o^+ \cos(\omega t + \delta^+) + V_o^- \cos(-\omega t + \delta^-) \\ V_o^+ \sin(\omega t + \delta^+) + V_o^- \sin(-\omega t + \delta^-) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中:  $v_o^+$  和  $v_o^-$  表示交流系统任一点  $o$  的正序和负序电压;  $V_o^+$  和  $V_o^-$  表示正负序电压对应的幅值;  $\delta^+$  和  $\delta^-$  分别为正负序电压的初相角。逆变器输出电流可以表示为:

$$i = i^+ + i^- = \begin{bmatrix} I_d^+ \cos(\omega t + \delta^+) + I_q^+ \cos(\omega t + \delta^+) \\ I_d^+ \sin(\omega t + \delta^+) + I_q^+ \sin(\omega t + \delta^+) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} I_d^- \cos(-\omega t + \delta^-) - I_q^- \cos(-\omega t + \delta^-) \\ I_d^- \sin(-\omega t + \delta^-) + I_q^- \sin(-\omega t + \delta^-) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中:  $I_d^+$ 、 $I_d^-$ 、 $I_q^+$ 、 $I_q^-$  分别表示正负序有功、无功电流分量。在不平衡电压跌落情况下, 逆变器交流侧不同位置正负序电压间的关系可表示为:

$$v^+ = v_g^+ + L_g \frac{di^+}{dt} \quad (14)$$

$$v^- = v_g^- + L_g \frac{di^-}{dt} \quad (15)$$

式中:  $v_g^+$  和  $v_g^-$  为并网点正负序电压;  $L_g$  为线路等效电

感。由上述公式推导出如下公式：

$$V^+ = \sqrt{(V_g^+)^2 - (\omega L_g I_d^+)^2} + \omega L_g I_q^+ \quad (16)$$

$$V^- = \sqrt{(V_g^-)^2 - (\omega L_g I_d^-)^2} - \omega L_g I_q^- \quad (17)$$

式(16)和(17)是上下文实现网点电压平衡的基础。

## 2.2 仿真研究与分析

为验证加装 SVG 对风电系统无功补偿的有效性,由于蒙东某电场是由 50 个容量为 3 MW 的双馈风机所构成,故仿真验证搭建了一个容量为 3 MW 的双馈风力发电机并网的过程,通过加装一个 SVG 后观察其对 DFIG 并网时电流和电压,以及对发电机的转速、桨距角和功率的影响情况,最终分析出在并网时电压的协调控制中加装无功补偿装置的重要性。

设置双馈风力发电机的装机容量为 3 MW。设置电压在 15 s 时进行突变,相对应的有功功率和无功功率的波形在 15 s 时发生变化,可以看出当未并入 SVG 时,由于系统调节能力较差所以有功功率直接衰竭到 0。而并入 SVG 后整个系统在故障后有功功率仍可以稳定在参考值。

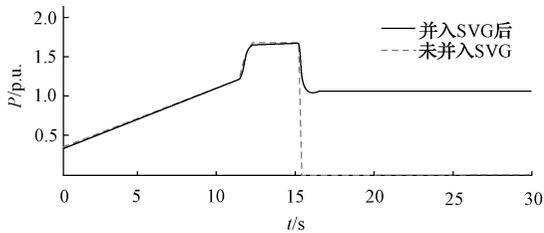


图 7 DFIG 功率波形

Fig. 7 DFIG power waveform

图 8(a)~(c)分别为发电机功率、转速和桨距角,发电机转速一般在 0.7~1.3 之间,在 15 s 之后的风速波形显然是不符合规定的,而且在未接入 SVG 时桨距角明显失去了控制,角度在一直变大,而有功功率由于电压突变无法维持系统正常运行,所以也衰减为 0,从上面几个电力系统的变量来看并网时电压发生变化对双馈发电系统有着很严重的影响。

仿真结果表明,虽然双馈风能发电厂的变速恒频控制系统具有自我调节能力,虽然双馈风力机虽自身拥有无功补偿能力,但 SVG 的接入仍旧可以改善 DFIG 在并网时的暂态电流稳定性,也可以提高双馈风电机自身的运行能力。

## 3 DFIG 与 SVG 协同控制电压的方法

在解决风电场并网点电压稳定控制问题时,通过深入研究和实验验证,发现经过参数优化后的 DFIG 和 SVG 联合在应对电压波动事件时展现出了更为优异的响应性能。这些优化后的设备能够更有效地控制并网点电压,确保电网的稳定运行。

针对并网事件所引发的电压波动,仅靠 SVG 的先行动作可能会减少其无功输出余量,因此,在电压稳定之后,

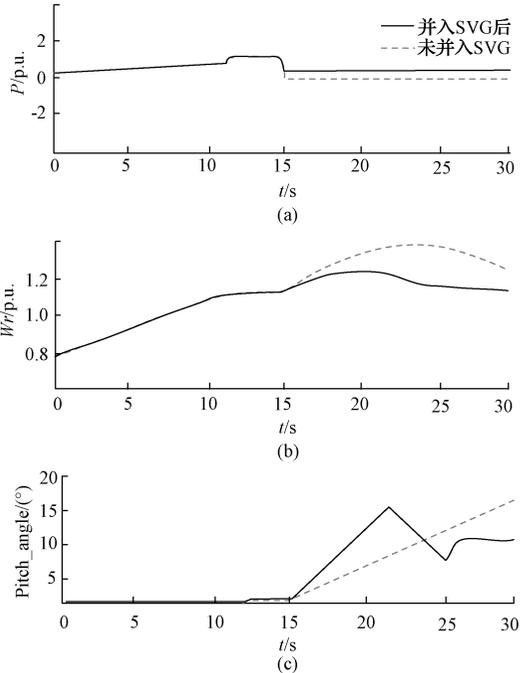


图 8 发生电压波动后功率、转速、桨距角

Fig. 8 Speed, pitch angle, and power after voltage fluctuation

采取了灵活的控制策略,将 SVG 的部分无功输出责任转移至 DFIG。这种策略不仅有效利用了 DFIG 的无功输出潜力,还有助于维持 SVG 的无功余量,从而增强了整个系统的电压稳定性与响应灵活性。这种策略的实施,旨在通过灵活调整无功功率的分配,进一步增强系统对并网过程中电压波动的稳定能力,从而保障电力系统的可靠性和稳定性。整体流程如图 9 所示。

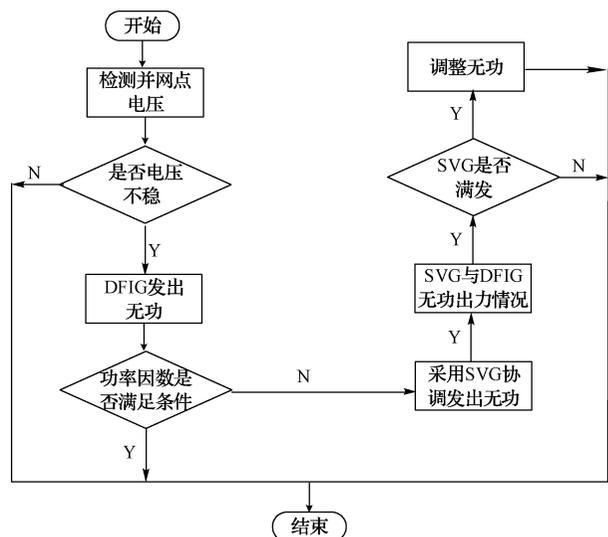


图 9 SVG 协同 DFIG 对风电场电压调节的控制流程

Fig. 9 Control process of SVG collaborative DFIG for wind farm voltage regulation

针对 DFIG 和 SVG 的无功控制,控制的目标在于稳定风电场并网点的电压,因此,无功参考值的设定需基于并网点的实时电压状况。利用 LADRC 控制算法,电压的微小偏差能迅速转化为无功功率的调整量,再结合优化的协同控制策略,实现对 DFIG 和 SVG 的高效、有序管理。下面详细阐述两者的协同控制策略。

双馈风电场与 SVG 协调控制的步骤大致分为 3 步。1) 电能质量判断,对风电场并网点的电压实施持续的监控,并汇集所获得的数据进行详细分析。基于这些分析数据,将电压水平进行评估,确认其是否维持在预先设定的安全阈值内。一旦发现电压未能达到预定的标准,系统会立即启动电压调节流程;而若电压表现稳定,则将转入无功补偿的调整阶段。2) 电压调整阶段,在当前阶段,根据电压偏差的实际情况,DFIG 和 SVG 会执行无功补偿操作。为了最大化 SVG 快速调节无功的能力,当 SVG 具备足够的无功资源时,会优先采用 SVG 进行无功补偿。在 DFIG 和 SVG 协同工作期间,需要确保 DFIG 的无功输出不仅支持电压调整,还要符合功率因数的规定。3) 无功调整阶段,当电压达到要求并确认其稳定后,进入无功调整阶段。此时,将根据 SVG 和 DFIG 当前的无功输出能力,对无功进行合理分配,以保持电压的稳定性。如果电压再次波动,系统将重新启动测量与判断流程,必要时再次进行电压调整。

#### 4 基于蒙东某风电场的控制策略仿真验证

根据内蒙古东部锡林郭勒盟的实际情况,选定双馈风机风速相关参数如下:额定风速为静态 8.2 m/s、切入风速为 2.5 m/s、切出风速为 20 m/s,且在 1 s 时模拟并网接入因故障而造成的低电压状态。结合第 2、3 节的控制策略,建立了采用 LADRC 控制策略代替传统 PI 控制,且与 SVG 联合协调控制的 DFIG 并网模型。实验设置两组对照组,其仿真结果如图 10 所示。3 种曲线的前提条件均一致:风机容量为 3 MW,且 DFIG 风速从 0 到恒定过程中添加扰动模拟其故障状态,即在 1.1~1.2 s 内观察 3 种工况下的低电压穿越能力,最终验证本文控制策略相较传统控制策略优越性。

将 LADRC 曲线和传统 PI 控制曲线作为一组、传统 PI 控制曲线和 LADRC+SVG 曲线作为一组进行对比分析。通过 LADRC 改进转子侧控制策略比传统控制策略波形稳定。对比 LADRC+SVG 曲线和传统 PI 控制曲线部分,加装 SVG 后,通过实施改进的控制策略,DFIG 机端电压的改善效果显著且更为优化。

超级电容荷电状态如图 11 所示,可以看出超级电容在双馈风机系统起步阶段参与充放电,并且在系统稳定后超级电容充满电,在未来发生的故障情况下其发出其储存的电能使系统更快的恢复到稳定状态。分别使用传统 PI

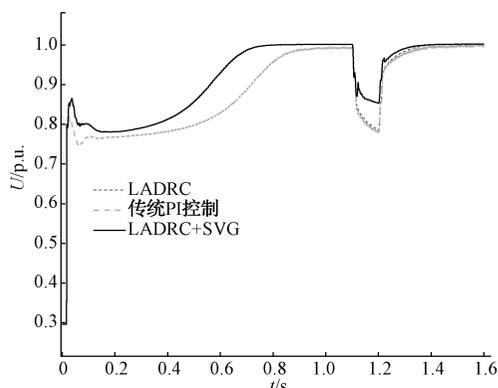


图 10 加装 SVG 与改进转子侧控制策略效果对比仿真  
Fig. 10 Comparison simulation of the effect of adding SVG and improving rotor side control strategy

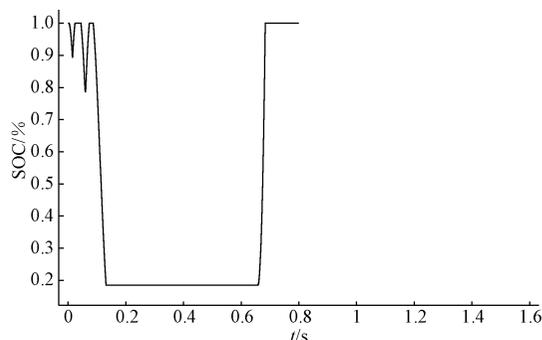


图 11 超级电容荷电状态  
Fig. 11 State of charge of supercapacitors

控制与 LADRC 时,DFIG 直流电压电压与电流对比如图 12、13 所示。

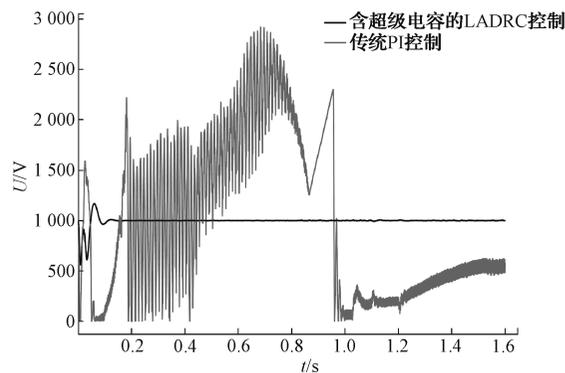


图 12 直流电压对比仿真  
Fig. 12 DC voltage comparison simulation

当 SVG 接入时,其发出无功功率如图 14 所示。

综上所述,用 LADRC 改进转子侧控制策略以及加装 SVG 对比原有控制策略均能对 DFIG 系统稳定进行加强。

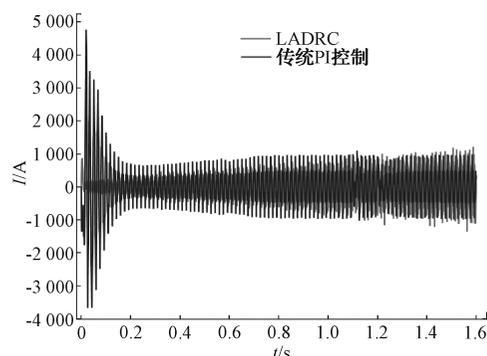


图13 电流波形对比

Fig. 13 Comparison of current waveforms

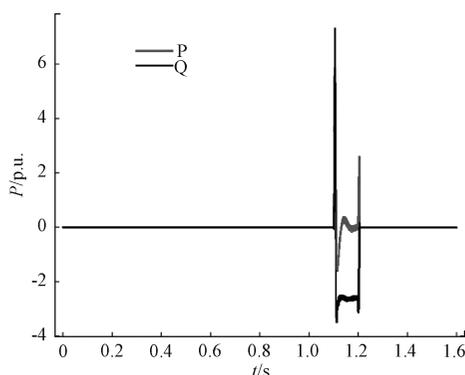


图14 SVG负向吸收无功功率协同调节仿真

Fig. 14 Simulation of SVG negative absorption reactive power collaborative adjustment

## 5 结论

本文实验结果表明,超级电容对于解决交直流侧能量不匹配问题起到重要作用。且经 SVG 与 LADRC 优化后的 DFIG 的协同调压策略在应对并网突发事件时能够发挥较好的作用,在仿真中出现因故障导致电压下降,通过 SVG 协同控制可以降低这种低电压情况带来的影响,帮助系统稳定运行。改进几者协调的控制策略既能节省无功补偿装置成本;又可以优化系统的运行波形,减轻并网波动对 DFIG 造成的负担,使其发出有功功率的效率更高。

### 参考文献

- [1] 曹刚. 关于风电技术现状及其发展趋势的探讨[J]. 科技创新与生产力, 2023, 44(12): 86-88, 91.  
CAO G. Discussion on the current situation and development trends of wind power technology[J]. Science and Technology Innovation and Productivity, 2023, 44(12): 86-88, 91.
- [2] 宋剑波. 风力发电技术的现状与发展综述[J]. 集成电路应用, 2022, 39(4): 148-149.

SONG J B. Overview of the current situation and development of wind power generation technology [J]. Integrated Circuit Applications, 2022, 39(4): 148-149.

- [3] 李书琦, 乔元, 于连富, 等. 风电场无功电压控制系统和方法: CN113013913A [P]. 2021-06-22.  
LI SH Q, QIAO Y, YU L F, et al. Wind farm reactive voltage control system and methods: CN113013913A [P]. 2021-06-22.
- [4] 郝嘉诚. 风电场无功电压协调控制策略[D]. 保定: 华北电力大学, 2018.  
HAO J CH. Reactive power and voltage coordination control strategy for wind farms [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2018.
- [5] 高歌, 刘毅力, 马龙涛, 等. ETAP 在 110 kV 终端变电站无功补偿配置上的应用[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(10): 22-25.  
GAO G, LIU Y L, MA L T, et al. Application of ETAP in reactive power compensation configuration of 110 kV terminal substations [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(10): 22-25.
- [6] 于大海, 郝俊红, 高严. 双馈电机风电场的无功功率和控制策略[J]. 中国高新技术, 2023(17): 127-128, 134.  
YU D H, HAO J H, GAO Y. Reactive power and control strategy of doubly fed wind farms [J]. China High and New Technology, 2023(17): 127-128, 134.
- [7] 邹小洪. 直驱永磁风力发电机全功率变流器冷却系统远程控制技术研究[J]. 红水河, 2019, 38(4): 51-54.  
ZOU X H. Discussion on remote control technology of full power converter cooling system for direct-drive permanent-magnet wind turbine generator [J]. Hongshui River, 2019, 38(4): 51-54.
- [8] 王自勇, 徐传国, 胡小明, 等. STATCOM 控制方法的研究[J]. 电工技术, 2023(15): 15-19.  
WANG Z Y, XU CH G, HU X M, et al. Research on STATCOM control method [J]. Electrical Technology, 2023(15): 15-19.
- [9] 李圣清, 文颜焱, 郑剑, 等. 储能型双馈风电机与 SVG 的无功电压联动控制策略[J]. 湖南电力, 2022, 42(3): 43-48.  
LI SH Q, WEN Y X, ZHENG J, et al. Reactive voltage linkage control strategy for energy storage doubly fed wind turbines and SVGs [J]. Hunan Electric Power, 2022, 42(3): 43-48.
- [10] 许荣彪. 风电并网系统电压无功控制策略研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.  
XU R B. Research on voltage and reactive power control strategy for wind power grid connected systems [D]. Kunming: Kunming University of

- Technology, 2023.
- [11] 施昕昕, 伦靖怡. 基于模糊 PI 和线性自抗扰的下垂控制研究[J]. 电气自动化, 2023, 45(6): 62-64, 68.  
SHI X X, LUN J Y. Research on droop control based on fuzzy PI and linear self disturbance rejection [J]. Electrical Automation, 2023, 45 (6): 62-64, 68.
- [12] 程启明, 周伟成, 程尹曼, 等. 基于线性自抗扰控制的双馈风机次同步振荡抑制研究[J/OL]. 电力建设, 1-14 [2024-03-06].  
CHENG Q M, ZHOU W CH, CHENG Y M, et al. Research on subsynchronous oscillation suppression of doubly fed fans based on linear active disturbance rejection control [J/OL]. Electric Power Construction, 1-14 [2024-03-06].
- [13] 张惠强. 基于 MATLAB 的双馈风力发电机组动态特性分析[J]. 中国设备工程, 2023(20): 109-112.  
ZHANG H Q. Dynamic characteristics analysis of doubly fed wind turbines based on MATLAB [J]. China Equipment Engineering, 2023(20): 109-112.
- [14] 马政阳. 电压源型双馈风电机并网稳定控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.  
MA ZH Y. Research on grid connected stable control method for voltage source doubly fed wind turbines [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [15] 程进, 潘智轩, 程海峰, 等. 双馈感应风力发电机的电压/频率协调控制策略[J]. 电气传动, 2022, 52(23): 18-27.  
CHENG J, PAN ZH X, CHENG H F, et al. Voltage/frequency coordinated control strategy for doubly fed induction wind turbines [J]. Electrical Transmission, 2022, 52 (23): 18-27.
- [16] 沙忻昱, 陈超波. 双馈风电机建模与变桨距角控制[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(5): 55-61.  
SHA X Y, CHEN CH B. Modeling and pitch angle control of doubly fed wind turbines [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38 (5): 55-61.
- [17] 张鹏强, 闫晓健, 孟子涵, 等. 基于自抗扰控制的网络构建及其协调控制研究[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(11): 97-105.  
ZHANG P Q, YAN X J, MENG Z H, et al. Research on network construction and coordinated control based on active disturbance rejection control [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42 (11): 97-105.
- [18] 邹志策, 张玉荣, 雷一, 等. 基于转子多阶串联动态电阻的 DFIG 自适应 LVRT 控制策略[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 224-233.  
ZOU ZH C, ZHANG Y R, LEI Y, et al. DFIG adaptive LVRT control strategy based on rotor multi-stage series dynamic resistance [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39 (6): 224-233.
- [19] 佟艳, 贾贵玺, 刘卫华, 等. 基于 LabVIEW 的静止无功发生器研究 (SVG) [J]. 电子测量技术, 2007, 21(9): 68-70, 99.  
TONG Y, JIA G X, LIU W H, et al. Research on static var generator (SVG) based on LabVIEW [J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 21 (9): 68-70, 99.

#### 作者简介

郭驰岳, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电技术。

E-mail: 845089771@qq.com