

基于自抗扰控制的直驱风电场次同步振荡抑制策略

高本锋, 易友川, 邵冰冰, 王飞跃, 赵书强

(华北电力大学 河北省分布式储能与微网重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要:近年来,我国西部地区频繁出现直驱风电场与弱交流电网之间相互作用引发的次同步振荡(SSO)问题。为解决该问题,首先从SSO发生机理出发,提出了基于自抗扰控制(ADRC)理论的直驱风电场SSO抑制策略。该策略针对直驱风机网侧换流器设计了ADRC控制器替换电流内环PI控制器抑制策略。然后,从数学形式上推导得ADRC控制器抑制机理是ADRC控制器通过实时估计与补偿直驱风电场接入弱交流电网产生的影响,阻断直驱风电场与弱交流电网之间的相互作用,从而达到抑制SSO的目的。最后,基于PSCAD/EMTDC仿真软件,建立基于PI控制器和ADRC控制器的直驱风电场接入弱交流电网的电磁暂态仿真模型,对比分析PI控制器与ADRC控制器对SSO的抑制效果。仿真结果表明,ADRC控制器不仅对SSO具有较好的抑制效果,且具有较强的鲁棒性与适应性。这也从侧面证明了直驱风电场接入弱交流电网引发的次同步振荡主导因素是直驱风机网侧换流器电流内环PI控制器。

关键词:直驱风电场;弱交流电网;次同步振荡;自抗扰控制器;PI控制器

中图分类号:TM 614; TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202009015

0 引言

直驱风机D-PMSGs(Direct-drive Permanent Magnetic Synchronous Generators)由于没有齿轮箱和励磁系统,相对于其他类型风机可靠性更强,因此得到广泛应用。当直驱风机直接并网时,采用电压源换流器作为并网接口^[1]。在这种接口方式下,换流器常会与交流电网发生相互作用,导致系统存在诱发次同步振荡SSO(SubSynchronous Oscillation)的风险^[2]。

近年来,风机SSO事故在国内外屡次发生。2009年,美国德克萨斯州某风电场由于固定串补与转子换流器相互作用,首次发生SSO事故,造成大量风机脱网^[3]。2011年,华北沽源地区风电场也发生了类似的SSO事故^[4]。在这些事故中,涉及的风机种类是双馈风机,并认为直驱风机不会发生SSO。然而,2015年7月1日,我国新疆哈密地区某直驱风电场发生持续功率SSO,导致临近火电机组跳闸,损失严重^[2]。因此,直驱风机SSO问题开始获得专家学者的关注。基于上述背景,相关学者针对直驱风机SSO的机理开展了大量研究^[1-2,5-6]。研究显示该问题是由直驱风机网侧换流器与交流电网之间的相互作用引起的,与直驱风机轴系及机械部分无关,且交流电网强度越小,相互作用越强^[2,6]。直驱风机的

振荡形式与传统汽轮机组振荡形式不同。直驱风机的振荡形式是由网侧换流器主导,其振荡频率取决于网侧换流器的控制参数、交流电网强度和风电场出力情况^[1-2,6]。此外,直驱风机的并网方式与光伏电站相同,都以电压源换流器作为并网接口,使得光伏电站也将面临直驱风机所面临的SSO问题。因此,研究直驱风机SSO的抑制措施,对于新能源送出和电网的安全运行具有重要现实意义。

目前,针对直驱风电场SSO问题的抑制措施已经取得了一些成果,具体可以分为以下2类。第一类是通过优化控制器参数来达到抑制SSO的目的^[7-8]。文献[7]通过优化锁相环(PLL)参数以降低SSO发生的风险;文献[8]提出加快柔性直流输电(VSC-HVDC)送端电压外环控制速度或者减慢风机锁相环控制速度以抑制SSO的发生。虽然优化参数可以达到抑制振荡的目的,但可能会对原有控制效果产生影响^[9]。第二类是在直驱风机网侧换流器控制环节引入附加阻尼控制器,以提高系统阻尼来达到抑制SSO的目的^[10-12]。该类抑制策略不足之处在于附加阻尼过程涉及环节较多,参数优化耗时较长,尤其是输出信号往往延迟于输入信号。此外,对于这类抑制策略,系统运行工况一旦发生改变,就需要对附加阻尼控制器参数进行重新设定。对于工况多变的振荡,此类抑制策略还有些不足。因此,提出一种多工况风机抑制策略对于风机外送具有重要的现实意义。

自抗扰控制ADRC(Active Disturbance Rejection Control)是从非线性比例-积分-微分PID(Proportional-Integral-Derivative)发展而来的一种独立于模型的新型控制技术^[13]。该控制器由跟踪微分器

收稿日期:2020-05-07; **修回日期:**2020-07-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51507064);教育部中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2018MS087)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51507064) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of the Ministry of Education (2018MS087)

TD(Tracking Differentiator)、扩张状态观测器 ESO(Extended State Observer)、非线性状态误差反馈 NLSEF(NonLinear State Error Feedback)和扰动估计补偿这四部分组成。其中,扩张状态观测器是核心,能够扰动(建模、未建模动态和外扰)进行实时估计与补偿。因此,当系统存在扰动时,由于扰动能够被实时估计与补偿,使得系统抗扰能力增加。此外,该控制参数整定较为简单,对参数具有较强的鲁棒性,同一套参数可以适用于多工况模式。随着 ADRC 的提出,该控制已经成功应用于多个场景。例如,应用于火电机组^[14-15]、光伏电站^[16]、双馈风电场^[17],都解决了 SSO 问题。在解决 SSO 问题的过程中,ADRC 的应用形式可以分为 2 类。第一类是以附加阻尼控制器的形式抑制 SSO^[14-16]。ADRC 控制器将含有 SSO 信息量的信号作为输入信号,并将输出信号分配到控制回路上,以增加系统阻尼。第二类是替换 PI 控制器的形式抑制 SSO^[17]。文献[17]通过替换转子换流器有功内环 PI 控制器来达到抑制 SSO 的目的,但仅通过仿真的形式验证了该抑制策略的可行性与有效性,从数学形式角度出发分析 ADRC 抑制机理还有待进一步研究。此外,目前将 ADRC 控制器应用于直驱风电场^[18]只解决了转速波动问题,尚未有文献提出用 ADRC 解决直驱风电场 SSO 问题。

直驱风电场接入弱交流电网引发的 SSO 性质是小扰动向振荡发散的过程,而 ADRC 控制器能够对小扰动进行实时估计与补偿,阻碍小扰动向振荡发散的过程,从而达到抑制 SSO 的目的。并且,ADRC 可以解决所有次同步频率下的振荡问题,通过将所有次同步频率下的扰动归结为总扰动,以实施估计与补偿,消除次同步频率下扰动的影响。此外,ADRC 不需要硬件设备且鲁棒性强。由此看来,运用 ADRC 解决直驱 SSO 问题是一种可行的方案。

本文针对直驱风电场接入弱交流电网引发的

SSO 问题,首先分析该系统 SSO 现象的发生机理,得出网侧换流器电流内环 PI 控制器是发生 SSO 的主要因素。然后,在 SSO 发生机理的基础上,提出用 ADRC 控制器替换网侧换流器内环 PI 控制器的抑制策略。最后,基于 PSCAD / EMTDC 平台搭建直驱风电场接入弱交流电网系统的仿真模型,比较 ADRC 控制器与 PI 控制器的抑制效果,从而验证所提抑制策略的可行性与有效性。

1 SSO 发生机理

本文以我国新疆哈密直驱风电场接入弱交流电网引发的 SSO 问题为研究背景,其结构图如图 1 所示。

直驱风机 SSO 问题是由风机网侧换流器与弱交流电网之间相互作用引起的^[1-2,5-7],其机理如图 1 所示。当接入弱交流电网时,即投入线路等效电感 L_1 ,首先会在并网点产生次同步电流 Δi_{gsub} ,使线路上的电流发生畸变。产生的次同步电流 Δi_{gsub} 直接会引起并网点的电压变化,在并网点形成次同步电压 Δu_{gsub} 。然后,锁相环的输入电压是并网点的电压,使得弱交流电网的接入会在锁相环输出角度上增加一个次同步角度 $\Delta \theta_{sub}$ 。对于网侧换流器的控制策略,为保证电压外环和电流内环的配合,工程上常常将电压外环的带宽设置为电流内环的 1/10,而电流内环的带宽是开关器件和锁相环的 1/10^[11,6]。这样的设计下,相比于电压外环,电流内环由于时间常数小,对 SSO 反应更快速和直接。最后,线路上的次同步电流 Δi_{gsub} 结合次同步角度 $\Delta \theta_{sub}$ 直接反应在电流内环上,电流内环感受其变化后,通过 PI 控制器形成换流器畸变的输出电压 $\Delta u_{gsub,dq}$,产生新的次同步电流。新的次同步电流与原有的次同步电流形成正反馈,使得振荡增强,进而导致系统发生 SSO 而失稳^[5-6]。

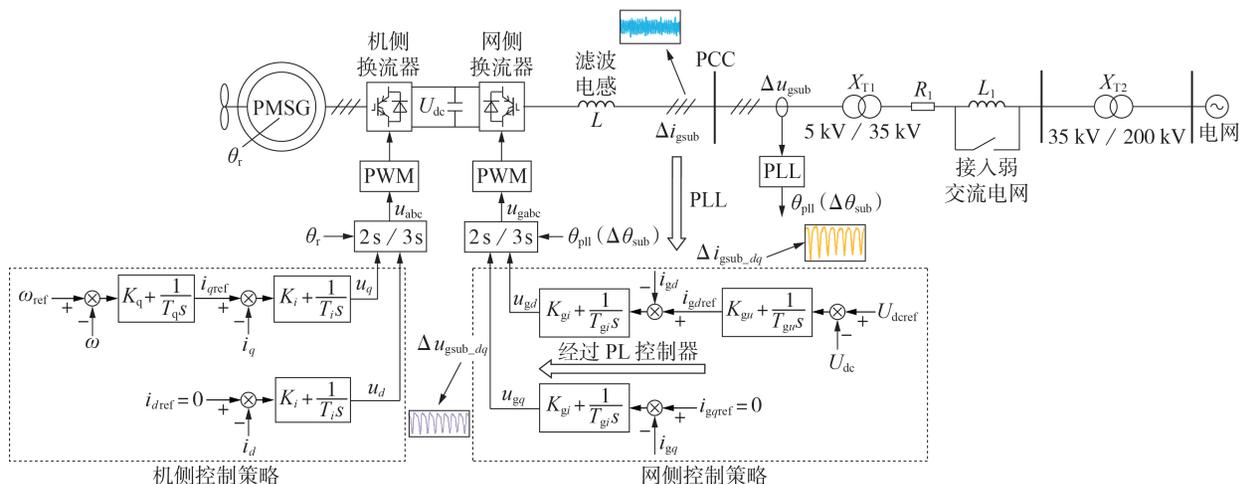


图 1 直驱风电场接入弱交流电网结构图

Fig.1 Structure diagram of D-PMSGs based wind farm connected to weak AC power grid

根据上述分析,直驱风电场接入弱交流电网产生的影响是通过网侧换流器电流内环的PI控制器反应在换流器的输出电压上,使换流器输出次同步电压,从而产生新的次同步电流,最后导致整个系统失稳。由此得出,网侧换流器电流内环PI控制器是导致SSO发生的主要因素之一。PI控制器抗干扰能力弱,对扰动有放大作用。采用ADRC能解决PI控制器存在的这些问题,并能够增加系统的抗扰能力。因此,对于直驱风机SSO问题,本文提出采用ADRC控制器替换网侧换流器电流内环PI控制器的抑制策略。

2 ADRC原理

ADRC是从经典PID控制技术演变而来的一种新型控制技术,汲取了经典PID技术和现代控制理论的精髓^[19]。经典PID控制常采用误差的比例、积分和微分的线性组合,大量工程实践表明,三者的线性组合方式不是最优方式,而且积分环节的引入会使系统反应变迟钝,易产生振荡等问题。ADRC舍弃了积分环节,采用非线性反馈结构来代替比例、积分和微分的线性组合,从根本上改进了PID的固有缺陷。

ADRC控制器的结构框图如附录图A1所示,每个环节的具体设计过程将在下文给出。图中, v_0 为被控制量的参考值; y 为被控制量的输出值; z_1 为输出量 y 的跟踪信号; z_2 为总扰动的观测值; f_0 为系统的已知部分; u 为系统的最终控制量; b_0 为动态补偿因子。

3 ADRC抑制SSO的原理

本节将对抑制机理进行分析。根据文献[20],当网侧换流器采用电压定向时,网侧换流器电流闭环控制在 dq 坐标系下的数学方程可表示为:

$$\begin{cases} u_d = L \frac{di_{gd}}{dt} + Ri_{gd} - \omega Li_{gq} + u_{gd} \\ u_q = L \frac{di_{gq}}{dt} + Ri_{gq} + \omega Li_{gd} + u_{gq} \end{cases} \quad (1)$$

其中, u_d 、 u_q 分别为网侧换流器输出电压 d 、 q 轴分量; L 为交流滤波电感; R 为换流器交流侧等效电阻; i_{gd} 、 i_{gq} 分别为换流器交流侧电流 d 、 q 轴分量; ω 为同步角速度; u_{gd} 、 u_{gq} 分别为并网点电压 d 、 q 轴分量。

当直驱风机接入弱交流电网时,根据式(1),其扰动方程可以表示为:

$$\begin{cases} \Delta u_{sub_d} = L \frac{d\Delta i_{gsub_d}}{dt} + R\Delta i_{gsub_d} - \omega L\Delta i_{gsub_q} + \Delta u_{gsub_d} \\ \Delta u_{sub_q} = L \frac{d\Delta i_{gsub_q}}{dt} + R\Delta i_{gsub_q} + \omega L\Delta i_{gsub_d} + \Delta u_{gsub_q} \end{cases} \quad (2)$$

其中, Δu_{sub_d} 、 Δu_{sub_q} 分别为网侧换流器输出的次同步电压 d 、 q 轴分量; Δi_{gsub_d} 、 Δi_{gsub_q} 和 Δu_{gsub_d} 、 Δu_{gsub_q} 分别

为次同步电流产生时,换流器交流侧电流和并网点电压变化量的 d 、 q 轴分量。

为分析网侧换流器电流内环PI参数的影响,根据图1所示的网侧换流器控制环节,式(2)可表示为:

$$\begin{cases} \Delta u_{sub_d} = \left(K_{gi} + \frac{1}{T_{gi}s} \right) \Delta i_{gsub_d} - \omega L \Delta i_{gsub_q} + \Delta u_{gsub_d} \\ \Delta u_{sub_q} = \left(K_{gi} + \frac{1}{T_{gi}s} \right) \Delta i_{gsub_q} + \omega L \Delta i_{gsub_d} + \Delta u_{gsub_q} \end{cases} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,直驱风电场接入弱交流电网引发的次同步电流,经过网侧换流器电流内环PI环节,在换流器的输出电压上叠加了次同步分量。同时,由式(3)可知,PI参数对次同步分量有放大作用,使得振荡加剧,从而发生了SSO,在文献[1,6]中都得到了相似的结论。在实际工程中,系统运行工况多变,而且系统的PI参数是提前设定好的。因此,通过调整PI参数来抑制SSO的方法不具有通用性,需要从其他方面考虑抑制措施。若在直驱风电场接入弱交流电网后,维持网侧换流器输出电流不变,则换流器输出电压不含有次同步分量,从而破坏了SSO的产生过程,最后达到抑制SSO的目的。

基于上述分析,本文提出用ADRC控制器替换网侧换流器电流内环PI控制器的抑制策略。采用ADRC控制器实时估计与补偿次同步电流对风机输出电流产生的影响,维持风机输出电流不变。最终,风机网侧换流器输出电压不再含有次同步分量,从而阻断网侧换流器与弱交流电网之间的相互作用,达到抑制SSO的目的。下面以 d 轴为例详细说明抑制原理。

由式(1)可得,系统稳定运行时,换流器交流侧的电流可表示为:

$$\frac{di_{gd}}{dt} = \frac{u_d}{L} - \frac{Ri_{gd}}{L} + \omega i_{gq} - \frac{u_{gd}}{L} \quad (4)$$

当直驱风机接入弱交流电网时,即线路上有次同步电流产生,换流器交流侧的电流则可表示为:

$$\begin{aligned} \frac{di_{gd}}{dt} &= \frac{u_d + \Delta u_{sub_d}}{L} - \frac{R(i_{gd} + \Delta i_{gsub_d})}{L} + \\ &\omega(i_{gq} + \Delta i_{gsub_q}) - \frac{u_{gd}}{L} - \frac{\Delta u_{gsub_d}}{L} - \frac{d\Delta i_{gsub_d}}{dt} = \\ &\frac{u_d}{L} + f(\Delta i_{sub_d}, \Delta i_{sub_q}) - \frac{Ri_{gd}}{L} + \omega i_{gq} - \frac{u_{gd}}{L} \quad (5) \\ f(\Delta i_{sub_d}, \Delta i_{sub_q}) &= \frac{\Delta u_{sub_d}}{L} - \frac{R\Delta i_{gsub_d}}{L} + \\ &\omega \Delta i_{gsub_q} - \frac{\Delta u_{gsub_d}}{L} - \frac{d\Delta i_{gsub_d}}{dt} \quad (6) \end{aligned}$$

其中, Δi_{sub_d} 、 Δi_{sub_q} 分别为网侧换流器交流侧次同步电流 d 、 q 轴分量。

当用ADRC控制器替换PI控制器后,ADRC控制器能够对 $f(\Delta i_{sub_d}, \Delta i_{sub_q})$ 进行实时估计,并在网侧

换流器输出电压上进行实时补偿,则采用 ADRC 控制器后式(5)变为:

$$\begin{aligned} \frac{di_{gd}}{dt} &= \frac{1}{L} (u_d - Lf(\Delta i_{sub_d}, \Delta i_{sub_q})) + \\ & f(\Delta i_{sub_d}, \Delta i_{sub_q}) - \frac{Ri_{gd}}{L} + \omega i_{gq} - \frac{u_{gd}}{L} = \\ & \frac{u_d}{L} - \frac{Ri_{gd}}{L} + \omega i_{gq} - \frac{u_{gd}}{L} \end{aligned} \quad (7)$$

通过比较式(4)和式(7)可以发现,风机在接入弱交流电网下,风机输出电流 i_{gd} 和稳定运行时的表达相同。说明在 ADRC 控制器下,风机电流不受弱交流电网的影响,从而通过控制环节使风机网侧换流器不输出次同步电压 Δu_{sub_d} ,最终系统不发生 SSO。因此,ADRC 控制器的引入,通过对扰动的实时估计与补偿,使得能够阻断直驱风机网侧换流器与弱交流电网之间的相互作用,从而达到抑制 SSO 的目的。

4 基于 ADRC 的直驱风机 SSO 抑制策略

4.1 ADRC 控制器应用于直驱风机网侧换流器设计

根据式(1),直驱风机接入弱交流电网时,网侧换流器交流侧电流可以表示为:

$$\begin{cases} \frac{di_{gd}}{dt} = bu_d + f_1(\Delta i_{sub_d}, \Delta i_{sub_q}) - \frac{Ri_{gd}}{L} + \omega i_{gq} - \frac{u_{gd}}{L} \\ \frac{di_{gq}}{dt} = bu_q + f_2(\Delta i_{sub_d}, \Delta i_{sub_q}) - \frac{Ri_{gq}}{L} - \omega i_{gd} - \frac{u_{gq}}{L} \end{cases} \quad (8)$$

其中, b 为动态补偿因子且 $b=1/L$; $f_1(\Delta i_{sub_d}, \Delta i_{sub_q})$ 、 $f_2(\Delta i_{sub_d}, \Delta i_{sub_q})$ 分别为次同步电流在 d 、 q 轴的扰动。

从式(8)可看出, d 轴与 q 轴存在耦合。为实现对电流的精确解耦控制,常将耦合项包含于扰动里,则式(8)变为:

$$\begin{cases} \frac{di_{gd}}{dt} = bu_d + F_1(\Delta i_{sub_d}, \Delta i_{sub_q}) - f_d \\ \frac{di_{gq}}{dt} = bu_q + F_2(\Delta i_{sub_d}, \Delta i_{sub_q}) - f_q \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} F_1(\Delta i_{sub_d}, \Delta i_{sub_q}) = f_1(\Delta i_{sub_d}, \Delta i_{sub_q}) - \frac{Ri_{gd}}{L} + \omega i_{gq} \\ F_2(\Delta i_{sub_d}, \Delta i_{sub_q}) = f_2(\Delta i_{sub_d}, \Delta i_{sub_q}) - \frac{Ri_{gq}}{L} - \omega i_{gd} \\ f_d = \frac{u_{gd}}{L} \\ f_q = \frac{u_{gq}}{L} \end{cases} \quad (10)$$

其中, $F_1(\Delta i_{sub_d}, \Delta i_{sub_q})$ 、 $F_2(\Delta i_{sub_d}, \Delta i_{sub_q})$ 分别为 d 、 q 轴的总扰动; f_d 、 f_q 分别为 d 、 q 轴系统已知部分。

由于式(9)为一阶状态方程,所以本文设计一阶 ADRC 控制器。由于一阶 ADRC 控制器的跟踪微分器只输出跟踪信号不输出差分信号,所以将其输入信号直接与扩张状态观测器观测到的信号进行差

分。因此,对于一阶 ADRC 控制器,可省略跟踪微分器环节,只需要考虑扩张状态观测器、非线性状态误差反馈和扰动估计补偿环节。ADRC 控制器替换网侧换流器电流环 PI 控制器的控制框图如图 2 所示。

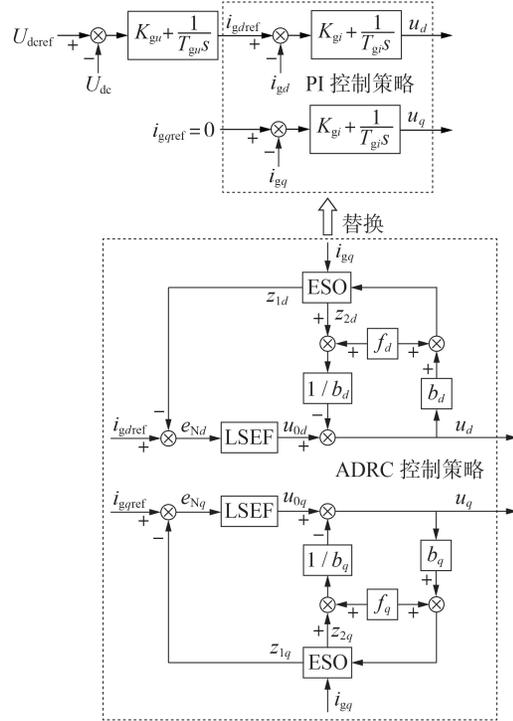


图 2 ADRC 控制器替换 PI 控制器的控制框图

Fig.2 Control block diagram of ADRC controller replacing PI controller

根据 ADRC 控制器分离性原理,每个环节可以单独设计,具体过程如下。

(1) 扩张状态观测器。

ADRC 控制器的核心设计就是对扩张状态观测器的设计,扩张状态观测器根据系统的输出和被控对象的输入来跟踪状态信息和估计出系统的扰动。为了实现对电流 i_g 的实时跟踪和系统扰动的估计,本文设计的扩张状态观测器如下:

$$\begin{cases} e_x = z_{1x} - i_{gx} \\ f_e = f_{al}(e_x, \alpha_x, \delta_x) \\ z_{1x} = z_{1x} + h(f_x + z_{2x} - \beta_{01x}e_x + b_x u_x) \\ z_{2x} = z_{2x} + h(-\beta_{02x}f_e) \end{cases} \quad (11)$$

其中,下标 x 为 d 或 q ,对应表示 d 轴或者 q 轴的扩张状态观测器; h 为仿真步长; z_1 为电流的状态跟踪; z_2 为系统总扰动的估计; β_{01} 、 β_{02} 为增益系数; f_{al} 函数是一种特殊的非线性结构,在原点附近具有线性段的连续幂次函数,是扩张状态观测器的核心部分,其算法如式(12)所示。

$$f_{al}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} e & |e| \leq \delta \\ \delta^{1-\alpha} & |e| > \delta \end{cases} \quad (12)$$

其中, α 为幂函数, 取值范围常在 0~1 之间; δ 为线性段区间的长度。

(2) 线性状态误差反馈(LSEF)。

对于 ADRC 控制器采用的非线性状态误差反馈, 往往较难选取参数。然而, 在大多数应用中, 用线性状态误差反馈能够抑制扰动。因此, 本文采用的是线性状态误差反馈控制, 在扩张状态观测器的基础上, 可得误差反馈形式为:

$$\begin{cases} e_{N_x} = i_{\text{gref}} - z_{1x} \\ u_{0x} = k e_{N_x} \end{cases} \quad (13)$$

其中, e_{N_x} 为 i_{gref} 与 ESO 输出的 z_{1x} 的信号差值; u_{0x} 为未经 ESO 动态补偿的控制器输出量; k 为可调系数。

(3) 扰动估计补偿。

通过扩张状态观测器估计得到的扰动, 对由式(13)确定的误差反馈量进行实时扰动补偿, 达到抑制 SSO 的目的。扰动估计补偿形成的最终控制量 u_x 为:

$$u_x = u_{0x} - \frac{f_x + z_{2x}}{b_x} \quad (14)$$

4.2 ADRC 控制器的参数整定

尽管 ADRC 控制器有较多参数需要整定, 因其本身的特性是每一环节的设计满足“分离性原理”^[21], 故只需对每一环节进行单独的参数整定即可。

(1) 扩张状态观测器。

从式(11)可看出, 在扩张状态观测器中, 有 h 、 α 、 β 、 δ 、 f 、 b 等参数需要整定, 其中 h 为基础参数, 直接与所运用的仿真软件步长有关; α 和 δ 决定了扩张状态观测器的非线性特性, 通常可取 $\alpha=0.5$ 、 $\delta=h$; β 的选取直接与仿真步长有关, 只要仿真步长相同, 则可以选取相同的 β ^[19], 本文取 $\beta_{01}=1/h$ 、 $\beta_{02}=1.5/h$; 对于 f 的取值, 由于 f 代表系统的已知部分, 因此可按替换前稳态值进行选取; 动态补偿因子 b 是与被控对象相关的唯一参数。若 b 已知, 则直接取值, 在本文中, $b=1/L$ 已知, 故直接选取即可; 若 b 未知, 虽只能通过试错法进行选取, 但 ADRC 算法对 b 的估计精度要求很低, 只要相对误差在 30% 以内是不会影响控制效果的^[21]。因此, 对于参数 b 的选取也较为容易。

(2) 线性状态误差反馈。

对于线性状态误差反馈只有 1 个系数需要整定, 即可调系数 k 。 k 值越大, 跟踪速度越快, 但效果不佳。因此, 需要根据仿真效果来整定 k 值。

对于扰动估计补偿环节, 涉及的参数在前 2 个环节已经整定完毕。因此, 无需考虑此环节的参数整定。

5 仿真验证

为了验证 ADRC 抑制 SSO 的有效性, 本文基于 PSCAD / EMTDC 建立图 1 所示的等值聚合模型。在单台直驱风机详细模型的基础上并联理想受控电

流源等值 40 台风机, 单台风机的容量为 5 MW。对于交流电网, 通过调整线路电感 L_1 值来改变并网点的短路比 SCR (Short Circuit Ratio), 以模拟电网强度的变化。

机侧换流器控制策略采用的是最大转矩 / 电流控制策略, 控制风机的转速与风机定子的 d 轴分量; 网侧换流器控制策略采用的是定直流电压控制策略, 保持直流电压的恒定, 以便功率能够稳定地从机侧传输到网侧。系统具体参数如附录表 A1 所示。

5.1 PI 控制器与 ADRC 控制器抑制效果对比

SSO 在低风速下发生的可能性较大, 为了研究 ADRC 抑制效果, 设置风机的风速为 8 m/s。仿真开始时, 线路电感 L_1 被旁路。系统进入稳态后, 在 $t=2$ s 时, 线路电感 L_1 接入。设置 $L_1=0.0075$ H, 通过计算得到 $SCR=2.6$, 属于弱交流电网系统, 以模拟弱交流电网场景。

通过投入线路电感, 触发直驱风电场发生 SSO, 下面进行 PI 控制器与 ADRC 控制器的运行特性对比, 得到单台直驱风机的仿真波形如图 3 和图 4 所示。

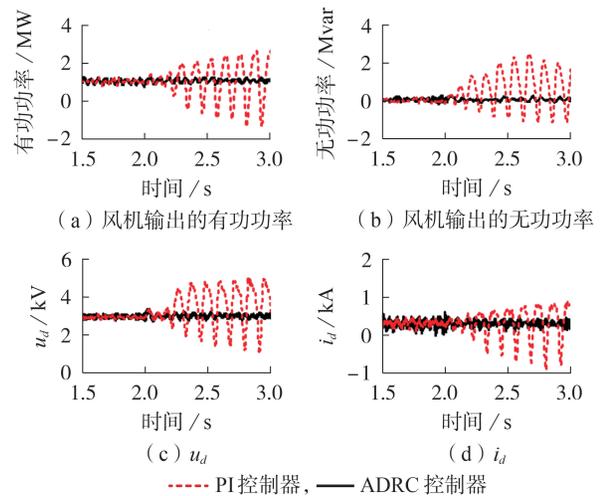


图3 PI 控制器与 ADRC 控制器响应特性曲线对比
Fig.3 Comparison of response characteristic curves between PI controller and ADRC controller

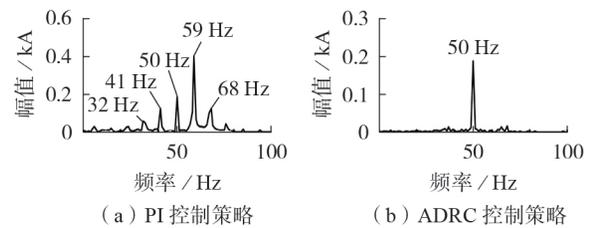


图4 不同控制策略的频谱分析

Fig.4 Spectrum analysis of different control strategies

由图 3 可知, 在 PI 控制器下, 随着直驱风电场接入弱交流电网, 风机输出功率、风机输出电流和网侧变流器的电压迅速振荡发散, 整个系统失去稳定性,

发生SSO。对此时风机的a相电流进行频谱分析,如图4(a)所示。可发现电流分量主要集中在32/68 Hz和41/59 Hz上,表明风电场接入弱交流电网后,激发了这2个频率下的振荡。当采用ADRC控制器时,随着风电场接入弱交流电网,风机输出功率、风机输出电流和网侧变流器的电压只在刚投入时发生轻微的暂态过程,然后迅速恢复到弱交流电网接入之前的运行状态,整个系统未发生SSO。图4(b)为在ADRC控制策略下对风机的a相电流进行的频谱分析,发现32/68 Hz和41/59 Hz下的电流分量被很好地消除,只存在工频下的分量。图3(d)为风机输出电流波形。由图3(d)可知,相比PI控制器,随着直驱风电场接入弱交流电网,ADRC控制器能够维持输出电流恒定,即消除接入弱交流电网对风机电流产生的影响。

综上仿真结果表明,ADRC能够抑制SSO的发生,验证了第3节理论分析的结果,也从侧面证明了直驱风机网侧换流器电流内环PI控制器是振荡产生的主导因素。

5.2 ADRC控制器对系统稳态影响

为了证明引入ADRC控制器对系统的稳态特性没有影响,设置工况如下:风机运行在强交流电网环境下,风速为8 m/s, $t=2$ s时,风机直流电压从5 kV阶跃到5.5 kV,其动态响应曲线如附录图A2所示。从图A2可以看出,当风机直流电压阶跃变化时,PI控制器与ADRC控制器均能快速地跟踪风机直流电压的变化;对于风机输出的功率,PI控制器与ADRC控制器仅在风机直流电压阶跃变化时,经历短暂的暂态过程后恢复原有的输出功率。由此可见,ADRC控制器具有良好的稳态特性。

5.3 ADRC的适应性研究

为了验证ADRC在抑制SSO方面的适应性,设置以下不同的工况:电网强度的变化,风电场风速的变化,接地短路故障的变化。

(1) 电网强度的变化。

电网强度是直驱风机发生SSO的重要因素,通过改变线路电感 L_1 大小改变SCR。设置风速为8 m/s,在 $t=2$ s时,投入线路电感,取值分别为0.006 25、0.007 5、0.008 75、0.01 H,相对应的SCR值 δ_{SCR} 分别为3.12、2.6、2.2、1.8,用来模拟交流电网强度变化。其中 $\delta_{SCR} \leq 3$ 为弱交流电网, $\delta_{SCR} < 2$ 为极弱交流电网^[22]。保持ADRC控制器参数不变研究ADRC对交流电网强度的适应性,其动态响应曲线如图5所示。

由图5可知,在PI控制器下,随着交流电网强度变弱,系统振荡强度加剧,系统都发生SSO;而采用ADRC控制器时,在参数不变的情况下,对弱交流电网和极弱交流电网下的SSO都能实现有效的抑制。对于极弱交流电网,即 $\delta_{SCR}=1.8$,如图5(d)所示ADRC

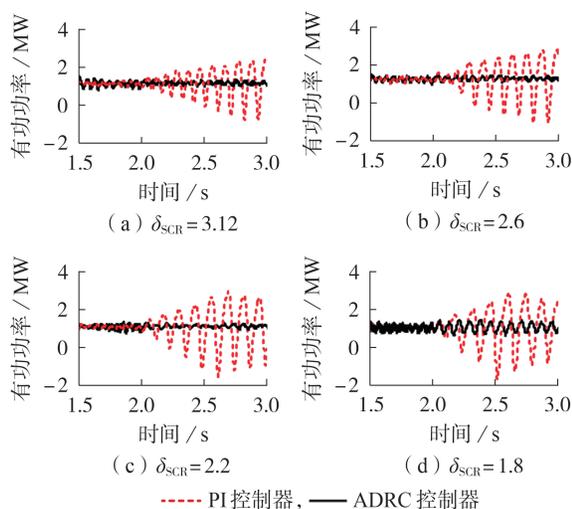


图5 不同电网强度下风机输出有功功率的响应曲线

Fig.5 Response curves of output active power for wind generator under different grid strengths

控制器抑制效果响应慢一些,但也能实现抑制。在实际工程中,出现极弱交流电网环境较少。因此,可以得出结论:ADRC控制器在参数不变的情况下,对不同电网强度下的SSO都能够进行有效的抑制,从而保证整个系统的稳定运行。

(2) 直驱风电场风速的变化。

考虑直驱风电场出力具有随机性、波动性等特点,有必要研究ADRC对风速的适应能力。

设置工况如下:直驱风机运行于不同的风速,在 $t=2$ s时,投入线路电感。保持ADRC控制器参数不变研究ADRC在不同的风速下对SSO的抑制能力,其动态响应曲线如图6所示。

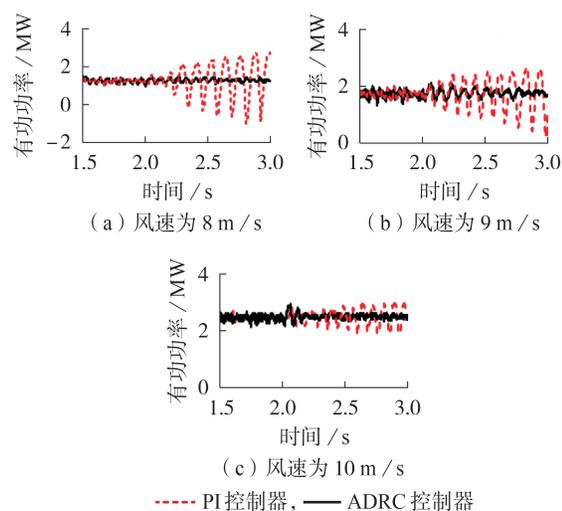


图6 不同风速下风机输出有功功率的响应曲线

Fig.6 Response curves of output active power for wind generator under different wind speeds

由图6可知,当采用PI控制器时,系统在3种风速下,风电场接入弱交流电网情况下都会发生SSO,

且振荡强度随着风速的增大而减小;而采用ADRC控制器时,风速变化对ADRC的抑制效果无影响,且在参数不变的情况下,对不同风速下的SSO都能够进行有效的抑制,从而保证整个系统的稳定运行。

(3)接地短路故障的变化。

考虑到接地短路故障在实际中经常发生,同时,接地短路故障作为一种扰动,也能够诱发系统发生SSO现象。因此,有必要研究ADRC控制器对不同接地短路故障的适应能力。

设置工况如下:风速为8 m/s,系统进入稳态后, $t=2$ s时,投入线路电感,即接入弱交流电网。针对将ADRC控制器接入弱交流电网, $t=2.5$ s时,在3 kV/35 kV线路变压器高压侧设置不同的接地短路故障,故障持续时间为20 ms。保持ADRC控制器参数不变研究ADRC控制器在接入弱交流电网后对不同接地短路故障的适应性,其动态响应曲线如附录图A3所示。由图A3可知,当采用PI控制器时,随着风电场接入弱交流电网,系统发生SSO;而当采用ADRC控制器时,风电场接入弱交流电网,系统不发生SSO;当 $t=2.5$ s时,随着系统发生不同接地短路故障,在ADRC控制器下,系统经历短暂的暂态过程后,系统恢复输出功率,不发生SSO。由此可见,接地短路故障对ADRC的抑制效果无影响。

6 结论

(1)分析了直驱风电场SSO发生机理,得出在SSO发生过程中,直驱风机网侧换流器的电流内环PI控制器起主导作用。

(2)针对直驱风电场接入弱交流电网发生的SSO问题,提出一种新型的抑制方法:用ADRC控制器替换直驱风机网侧换流器电流内环的PI控制器,通过消除接入弱交流电网对风机产生的影响,有效地抑制SSO发生。

(3)从数学形式上推导了ADRC控制器的抑制机理。

(4)在直驱风电场接入弱交流系统仿真模型下,验证了所提抑制策略的有效性,且相比于PI控制器,ADRC更能适应运行工况多变的系统。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 宋瑞华,郭剑波,李柏青,等. 基于输入导纳的直驱风电次同步振荡机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(16):4662-4670,4891.
SONG Ruihua, GUO Jianbo, LI Baiqing, et al. Mechanism and characteristic analysis of subsynchronous oscillation in direct-drive wind power generation system based on input-admittance analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4662-4670, 4891.
- [2] 谢小荣,刘华坤,贺静波,等. 直驱风机风电场与交流电网相互

作用引发SSO的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016,36(9):2366-2372.

XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2366-2372.

[3] ADAMS J, CARTER C, HUANG S H. ERCOT experience with sub-synchronous control interaction and proposed remediation [C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2012 IEEE PES. Orlando, FL, USA: IEEE, 2012: 1-5.

[4] XIE X, ZHANG X, LIU H, et al. Characteristic analysis of subsynchronous resonance in practical wind farms connected to series-compensated transmissions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1117-1126.

[5] 李景一,毕天姝,于钊,等. 直驱风机变频控制系统对次同步频率分量的响应机理研究[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1734-1740.

LI Jingyi, BI Tianshu, YU Zhao, et al. Study on response characteristics of grid converter control system of permanent magnet synchronous generators to subsynchronous frequency component[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1734-1740.

[6] 徐衍会,曹宇平. 直驱风机网侧换流器引发次/超同步振荡机理研究[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1556-1564.

XU Yanhui, CAO Yuping. Research on mechanism of sub/sup-synchronous oscillation caused by GSC controller of direct-drive permanent magnetic synchronous generator[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1556-1564.

[7] 张冲,王伟胜,何国庆,等. 基于序阻抗的直驱风电场次同步振荡分析与锁相环参数优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6757-6767, 7067.

ZHANG Chong, WANG Weisheng, HE Guoqing, et al. Analysis of sub-synchronous oscillation of full-converter wind farm based on sequence impedance and an optimized design method for PLL parameters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6757-6767, 7067.

[8] LIU H, SUN J. Voltage stability and control of offshore wind farms with AC collection and HVDC transmission[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 1181-1189.

[9] AMIN M, MOLINAS M. Understanding the origin of oscillatory phenomena observed between wind farms and HVDC systems[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1): 378-392.

[10] 周佩朋,宋瑞华,李光范,等. 直驱风电机组次同步振荡阻尼控制方法及其适应性[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(13): 177-188.

ZHOU Peipeng, SONG Ruihua, LI Guangfan, et al. Damping control method of subsynchronous oscillation for direct drive PMSG-based wind turbine generator and its adaptability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 177-188.

[11] 苏田宇,杜文娟,王海风. 多直驱永磁同步发电机并联风电场次同步阻尼控制器降阶设计方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 116-127.

SU Tianyu, DU Wenjuan, WANG Haifeng. A reduced order design method for subsynchronous damping controller of multi-PMSGs parallel wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 116-127.

[12] 陈宝平,林涛,陈汝斯,等. 机侧与网侧多通道附加阻尼控制器参数协调综合抑制低频振荡和次同步振荡[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 50-56, 62.

CHEN Baoping, LIN Tao, CHEN Rusi, et al. Parameter coordination of generator-side and grid-side multi-channel supple-

- mentary damping controllers to suppress low frequency oscillation and sub-synchronous oscillation comprehensively[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(11):50-56, 62.
- [13] HAN J. From PID to active disturbance rejection control[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900-906.
- [14] 高本锋,姚磊. 模糊自抗扰附加阻尼控制抑制光火打捆经串补送出的次同步振荡[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(7): 121-127.
GAO Benfeng, YAO Lei. Supplementary damping control of SSO based on fuzzy active disturbance rejection control for photovoltaic-thermal-bundled system transmitted by series compensation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(7): 121-127.
- [15] 毕悦,刘天琪,赵磊,等. 风火打捆外送系统次同步振荡的改进自抗扰直流附加阻尼控制[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(11):174-180.
BI Yue, LIU Tianqi, ZHAO Lei, et al. DC additional damping control of subsynchronous oscillation based on improved active disturbance rejection control for wind-thermal-bundled power system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(11):174-180.
- [16] 马燕峰,蒋云涛,陈磊,等. 光伏电站自抗扰附加阻尼控制抑制低频振荡策略研究[J]. *电网技术*, 2017, 41(6): 1741-1747.
MA Yanfeng, JIANG Yuntao, CHEN Lei, et al. An ADRC additional damping control strategy research on low frequency oscillation suppression of photovoltaic plants[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(6): 1741-1747.
- [17] 高本锋,胡韵婷,李忍,等. 基于自抗扰控制的双馈风机次同步控制相互作用抑制策略研究[J]. *电网技术*, 2019, 43(2): 655-664.
GAO Benfeng, HU Yunting, LI Ren, et al. Research on sub-synchronous control interaction mitigation strategy based on active disturbance rejection control for doubly-fed induction generator[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(2): 655-664.
- [18] 郑大周,兰杰. 直驱风力发电机组变桨距自抗扰控制器设计和分析[J]. *可再生能源*, 2019, 37(12):1875-1881.
ZHENG Dazhou, LAN Jie. Design and analysis of variable pitch ADRC for direct-drive wind turbine[J]. *Renewable Energy Resources*, 2019, 37(12): 1875-1881.
- [19] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. *前沿科学*, 2007(1):24-31.
HAN Jingqing. Auto disturbance rejection control technology[J]. *Frontier Science*, 2007(1):24-31.
- [20] 黄守道,高剑,罗德荣. 直驱永磁风力发电机设计及并网控制[M]. 北京:电子工业出版社,2014:35-38.
- [21] 韩京清. 自抗扰控制技术:估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,2008:243-287.
- [22] Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities:IEEE 1204-1997[S]. New York, USA:the Electrical and Electronics Engineers, Inc., 1997.

作者简介:



高本锋

高本锋(1981—),男,山东聊城人,副教授,博士,主要研究方向为高压直流输电和电力系统次同步振荡(E-mail: gaobenfeng@126.com);

易友川(1995—),男,四川广安人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统次同步振荡(E-mail: yiyouchuan1@163.com)。

(编辑 李玮)

Subsynchronous oscillation mitigation strategy based on ADRC for D-PMSGs based wind farm

GAO Benfeng, YI Yochuan, SHAO Bingbing, WANG Feiyue, ZHAO Shuqiang

(Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid of Hebei Province, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Recently, the problem that SSO (SubSynchronous Oscillation) caused by the interaction between D-PMSGs (Direct-drive Permanent Magnetic Synchronous Generators) based wind farm and weak AC power grid frequently occurs in western China. To solve this problem, the SSO mitigation strategy based on ADRC (Active Disturbance Rejection Control) is firstly proposed, in which the mechanism of SSO is utilized. In this strategy, the ADRC controller is designed to replace the PI (Proportional-Integral) controller of current inner loop of grid-side converter for D-PMSGs. Secondly, the mitigation mechanism of the ADRC controller is theoretically derived. This ADRC controller can estimate and compensate the real-time impact of D-PMSGs based wind farm integrated in weak AC power grid, and hence can avoid the interaction between D-PMSGs based wind farm and weak AC power grid. As a result, the SSO is expected to be effectively mitigated. Finally, an electromagnetic transient simulation model with both PI and ADRC controllers is built on PSCAD/EMTDC, and the mitigation effect of the two controllers on SSO are analyzed and compared. Simulative results show that the ADRC controller not only effectively mitigates SSO, but also exhibits satisfactory robustness and adaptability. It also proves that the main factor of SSO in D-PMSGs based wind farm lies in the PI controller of current inner loop of grid-side converter for D-PMSGs.

Key words: D-PMSGs based wind farm; weak AC power grid; subsynchronous oscillation; ADRC controller; PI controller

附录

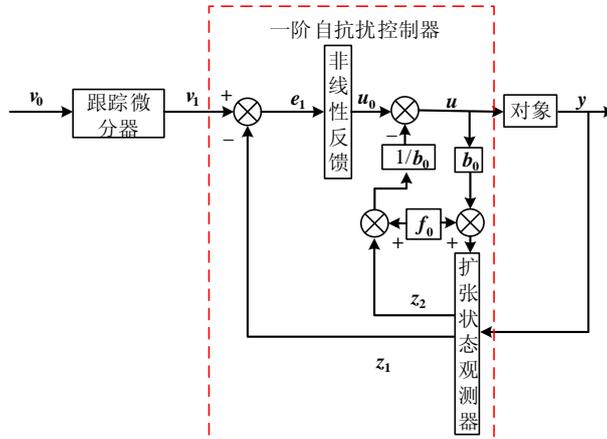


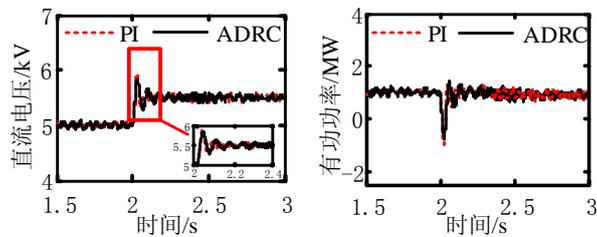
图 A1 一阶 ADRC 控制器结构框图

Fig.A1 Structure diagram of first-order ADRC controller

表 A1 系统具体参数

Table A1 Specific parameters of system

元件	参数	数值
风机	风轮半径 R	58 m/s
	空气密度 ρ	1.225 kg/m ³
	基准频率 f	10 Hz
	Ψ_f	0.0417 Wb
	极对数 n_p	49
直流	等效电感 L_s	0.01208 H
GSC	C	1200 μ F
	内环 PI 参数 (最优)	$K_{gu}=-0.6, K_{gu}=0.4$
ADRC	外环 PI 参数 (最优)	$K_{gi}=0.2, K_{gi}=0.0055$
	ESO	$b_x=500, \beta_{01x}=1/h$
	LSEF	$\beta_{02x}=1.5/h$
交流输电线路	滤波电感 L	0.002 H
	升压变比 k_{T1}	3 kV /35 kV
	升压变比 k_{T2}	35 kV /220 kV



(a) 风机直流电压

(b) 风机输出有功功率

图 A2 PI 控制器与 ADRC 响应特性曲线对比

Fig.A2 Comparison of response characteristic curve between PI controller and ADRC

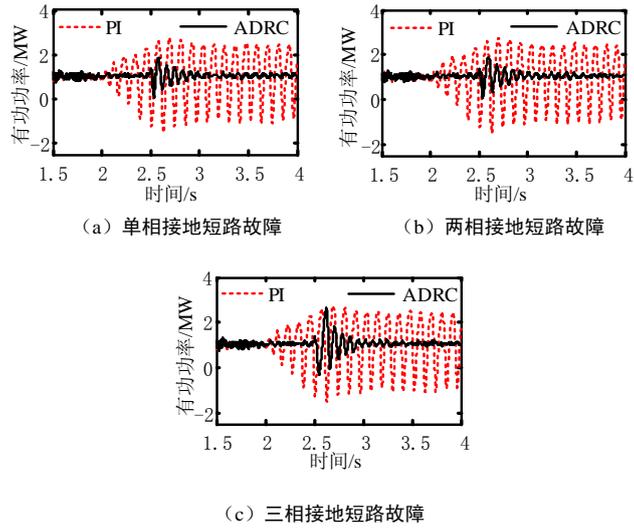


图 A3 不同短路故障下风机输出有功功率的响应曲线

Fig.A3 Response curve of generator output active power under different short circuit faults