基于改进型LADRC的STATCOM抑制双馈风电场次同步振荡策略

刘亚锦[1],廖雨欣[1],刘志坚[1],余成骏[1],段星桅[2]
(1. 昆明理工大学 电力工程学院,云南 昆明 650500;2. 昆明理工大学 现代农业工程学院,云南 昆明 650500)

摘要:针对双馈风电场经串联补偿线路送出引发的次同步振荡问题,提出了一种基于改进型线性自抗扰控制(LADRC)的静止同步补偿器(STATCOM),实现对系统次同步振荡的抑制。LADRC设计时考虑延时因素,在控制计算中消除由信号测量、传输等延时导致的输入量之间时间轴上的不匹配。基于改进型LADRC设计了STATCOM的附加阻尼控制器、电压外环、电流内环控制器以及锁相环,使STATCOM为系统提供正阻尼,同时增强控制系统的速动性和抗干扰能力,以适应次同步振荡工况,并从阻抗角度分析了STATCOM抑制次同步振荡的作用机理。在MATLAB/Simulink中搭建了系统的时域仿真模型,实验结果证实了所提出的抑制策略在动态性能和抗干扰方面的优越性。

关键词:线性自抗扰控制;STATCOM;双馈感应发电机;次同步振荡;串联补偿输电系统
中图分类号:TM614;TM712　　**文献标志码**:A　　DOI:10.16081/j.epae.202304009

0 引言

风电的装机容量逐年攀升,已成为可再生能源发电的主要组成部分,但我国主要的风能资源集中在中西部地区,与负荷中心整体呈现逆向分布[1]。由于电能输送距离长且规模大,常采用固定或可控串联补偿(以下简称"串补")来提高线路传输容量[2]。由串补引发的次同步振荡(sub-synchronous oscillation,SSO)事故屡次发生:2009年,美国德克萨斯州风电场发生了振荡频率为25 Hz左右的SSO事故[3];河北沽源以及吉林通榆的风电场经串补线路送出,分别在2012年和2016年发生振荡频率为6~8 Hz和5.33 Hz的SSO[4]。

工程和实验研究表明,串补与双馈感应发电机(doubly-fed induction generator,DFIG)交互引发SSO的机理是,DFIG转子换流器快速控制与串补相互作用,故又被称为次同步控制相互作用(sub-synchronous control interaction,SSCI)[5]。由于风电出力的随机性和时变性,振荡频率也呈现时变的特点,SSCI发散性更强,对电网稳定性的影响也更加恶劣,故亟需开展SSCI特征分析并探索相关的抑制方法。

文献[6-8]分别基于阻抗法、特征值法和复转矩系数法解释了SSCI发生机理,SSCI主要影响因素包括串补度、风速、变流器控制参数等。目前SSCI抑制措施主要分为3类。①采取切除串补、切机等被动措施来抑制风电场的SSO[9],但会减少风电场出力,且切除串补会降低线路输送能力和稳定性。②对DFIG控制器进行优化或附加阻尼控制。文献[10]提出反馈线性化滑模控制替换现有的比例积分(proportional integral,PI)控制器,改善系统鲁棒性,抑制SSO。在DFIG转子侧变流器(rotor side converter,RSC)、网侧变流器(grid side converter,GSC)中附加次同步阻尼控制(sub-synchronous damping control,SSDC)[11-12]。工程实现方面,需要逐台对DFIG进行现场升级改造,工程量大。③利用柔性交流输电系统(flexible AC transmission system,FACTS)装置可实现SSCI集中抑制。大型风电场会安装FACTS进行无功补偿,以改善公共耦合点(point of common coupling,PCC)处电压,防止电压跌落对DFIG转子变流器的损坏,提升系统输电能力。酒泉风电基地装机容量大,主流无功补偿装置在此均有装设,哈密的国华风电场在PCC处装设了6套容量为±45 Mvar的静止同步补偿器(static synchronous compensator,STATCOM)[13]。在FACTS中附加SSDC来抑制SSCI,不仅可以解决以上方法存在的问题,而且在经济性上具有突出优势[14]。

基于FACTS附加SSDC解决SSCI问题,文献[15-17]分别以DFIG转子角频率偏差、线路电流以及电压作为输入信号,依靠带通滤波器提取振荡模态分量,经过比例移相环节,向系统注入次同步阻尼电流。振荡频率需要与滤波器中心频率相匹配,比例移相环节参数配置合理,才能获得满意的抑制效果,该类方法无法适应时变的振荡环境。自抗扰控制(active disturbance rejection control,ADRC)不依赖系统精确数学模型,在非线性、强耦合、时变系统中具有较强的鲁棒性。文献[18]在STATCOM中附加ADRC阻尼控制器,克服了以滤波器为核心的抑制策略无法适应各种工况的问题,但ADRC为非线性形式,原理复杂且参数众多,工程运用困难。文献

收稿日期:2022-08-24;**修回日期**:2023-02-25
在线出版日期:2023-04-27

[19]提出线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control,LADRC),将控制参数减少到2个,且控制性能未受影响,在工程中得到广泛应用。

以上研究有以下局限性:①在LADRC的设计中,通常忽略延时因素,导致观测器输入量之间在时间轴上不匹配,降低控制器的跟踪精度并影响控制的可靠性;②STATCOM通常采用PI控制器,但当系统发生SSO时无法适应非线性、强耦合、时变的环境,同时积分器的计算延时,会造成输出相位偏移;③目前基于LADRC的阻尼控制仅在原有控制中增加一个LADRC模块,鲜有文献提出用全LADRC的控制系统对振荡进行抑制。

针对上述问题,本文提出了基于改进型LADRC的STATCOM来抑制双馈风电场SSCI。首先,改进了LADRC以消除延时带来的不良影响。随后,设计了全改进型LADRC的STATCOM控制系统,对各控制模块进行建模,进一步得到STATCOM整体导纳模型,从阻抗角度解释了STATCOM抑制SSCI的机理。最后,在时域模型中对比了改进型LADRC、传统LADRC和PI控制器对SSCI的抑制效果,验证了所提方法的有效性。

1 含STATCOM的双馈风电场–串补外送系统

1.1 系统整体结构

本文建立了在PCC处利用STATCOM提供电压支撑的双馈风电场经串补线路送出的等效模型,如图1所示。在系统建模中,假定风电场由N台完全相同的1.5 MW DFIG并联组成,风电经风电汇集站T_1和升压站T_2升压后,进入220 kV交流线路,经升压站T_3第三次升压后由500 kV串补线路并入无穷大电网。图中:R_{L1}、L_{L1}分别为220 kV交流线路的等效电阻和电感;R_{L2}、L_{L2}、C_{SC}分别为500 kV线路等效电阻、电感和串补电容;u_p为STATCOM与系统连接的PCC电压,STATCOM并联在双馈风电场的集中PCC处;$\Delta\omega_r$为转子角频率偏差量。

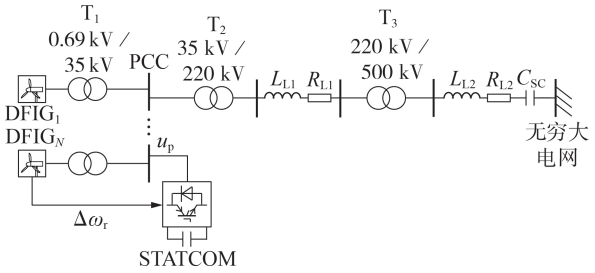


图1 含STATCOM的双馈风电场经串补的并网系统

Fig.1 Grid-connected system of doubly-fed wind farms with STATCOM through series compensation

1.2 STATCOM数学模型

STATCOM拓扑结构如图2所示。图中:L_c和R_c分别为STATCOM与电网之间的连接电感和电阻;C为直流侧电容值;u_{dc}为直流侧电容电压;u_{pa}、u_{pb}、u_{pc}为STATCOM与系统连接的PCC处三相电压;i_{ca}、i_{cb}、i_{cc}为STATCOM注入系统的三相电流;u_{ca}、u_{cb}、u_{cc}为STATCOM输出的三相电压。

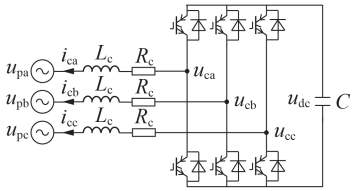


图2 STATCOM拓扑结构

Fig.2 Topology structure of STATCOM

在dq旋转坐标系下,STATCOM主电路的交流侧和直流侧数学模型可分别表示为:

$$\begin{cases} L_c\dfrac{\mathrm{d}i_{cd}}{\mathrm{d}t}=u_{pd}-R_c i_{cd}+\omega_0 L_c i_{cq}-u_{cd} \\ L_c\dfrac{\mathrm{d}i_{cq}}{\mathrm{d}t}=u_{pq}-R_c i_{cq}-\omega_0 L_c i_{cd}-u_{cq} \end{cases} \tag{1}$$

$$Cu_{dc}\frac{\mathrm{d}u_{dc}}{\mathrm{d}t}=\frac{3}{2}u_{cd}i_{cd}+\frac{3}{2}u_{cq}i_{cq} \tag{2}$$

式中:u_{pd}、u_{pq}分别为PCC处电压u_p的d、q轴分量;u_{cd}、u_{cq}分别为STATCOM输出电压u_c的d、q轴分量;i_{cd}、i_{cq}分别为STATCOM向系统注入电流i_c的d、q轴分量;ω_0为系统额定角频率。

2 基于改进型LADRC的STATCOM抑制双馈风电场SSCI控制结构

传统STATCOM可支撑风电场PCC处电压,但不能为系统提供正阻尼并抑制SSCI,故在STATCOM中附加SSDC,为系统提供正阻尼,STATCOM输出电压不仅包含工频电压,还将叠加次同步分量。STATCOM中电压电流双环控制采用PI控制器,但PI控制器中的积分器会产生积分延时,使控制系统整体速动性减弱,并造成输出电压相位偏移,影响抑制效果甚至可能对振荡产生助增作用。次同步信号有非线性、时变的特点,PI控制器参数适应性差、静态误差较大,无法适应SSCI环境。文献[20]在三相电压型脉宽调制(pulse width modulation,PWM)整流器中,将全LADRC系统与全PI控制系统进行对比分析,全LADRC系统动态跟踪性能、抗干扰能力和鲁棒性更强。故本文将STATCOM中电压电流双环控制中的PI控制器用改进型LADRC替代,并基于改进型LADRC为STATCOM设计附加阻尼控制器,构建改进型LADRC的控制系统,基于改进型LADRC的STATCOM控制模型见图3。

STATCOM控制采用dq轴电压电流双环控制策略,需要将控制量转换到dq坐标系下。在以系统实际相位θ_0为基准的dq坐标系中,PCC处电压

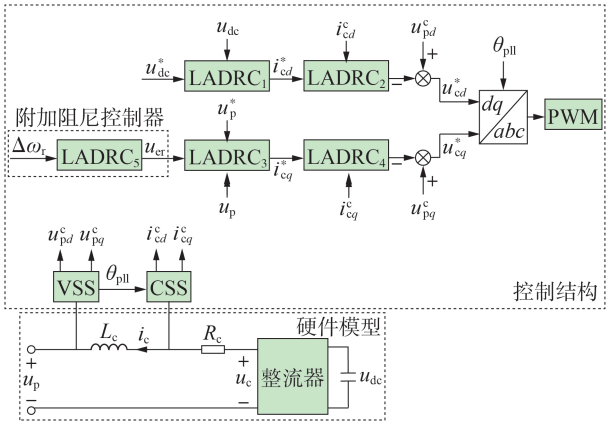


图3　基于改进型LADRC的STATCOM控制模型

Fig.3　STATCOM control model based on improved LADRC

向量表示为 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{p}}=[\,u_{pd}\ \ u_{pq}\,]^{\mathrm{T}}$，输出电流向量表示为 $\boldsymbol{i}_{\mathrm{c}}=[\,i_{cd}\ \ i_{cq}\,]^{\mathrm{T}}$。利用电压同步系统（voltage synchronization system，VSS）和电流同步系统（current synchronization system，CSS）将上述电压、电流向量转换到以锁相环（phase locked loop，PLL）提取到的跟踪相位 θ_{pll} 为基准的 dq 坐标系下，该坐标系中上述电压、电流向量可分别表示为 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{c}}=[\,u_{pd}^{\mathrm{c}}\ \ u_{pq}^{\mathrm{c}}\,]^{\mathrm{T}}$ 和 $\boldsymbol{i}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{c}}=[\,i_{cd}^{\mathrm{c}}\ \ i_{cq}^{\mathrm{c}}\,]^{\mathrm{T}}$。

LADRC_1 和 LADRC_2 分别为 d 轴的电压外环控制器和电流内环控制器，两者共同构成控制结构的 d 轴部分。目标是维持直流侧电容电压 u_{dc} 的恒定，如果 u_{dc} 有较大的波动，则会严重影响振荡抑制效果并降低STATCOM运行稳定性。LADRC_1 输入量为电容电压参考值 u_{dc}^{*} 和 u_{dc}，输出量为 d 轴电流内环参考值 i_{cd}^{*}，LADRC_2 使 i_{cd}^{c} 跟踪其参考值 i_{cd}^{*}。LADRC_5 为附加阻尼控制器，将含有振荡信息的转子角频率偏差 $\Delta\omega_{\mathrm{r}}$ 作为控制的输入信号，输出SSCI抑制电压 u_{er}。LADRC_3 和 LADRC_4 分别为 q 轴的电压外环控制器和电流内环控制器，两者共同构成控制结构的 q 轴部分，即负责STATCOM无功部分的控制。u_{er} 作为 LADRC_3 的输入，可对PCC处电压 u_{p} 进行适当调制，从而实现SSCI抑制。同时PCC处电压参考值 u_{p}^{*} 和 u_{p} 作为 LADRC_3 的输入，使STATCOM输出相应的无功功率以维持PCC处电压的稳定。因此 LADRC_3 的参考输入为 $u_{\mathrm{er}}+u_{\mathrm{p}}^{*}$，$u_{\mathrm{p}}$ 为实际测量值，输出量为 q 轴电流内环参考值 i_{cq}^{*}，LADRC_4 使STATCOM输出的 q 轴电流的测量值 i_{cq}^{c} 跟踪其参考值 i_{cq}^{*}。LADRC_2、LADRC_4 输出量与 u_{pd}^{c}、u_{pq}^{c} 分别相加后得到STATCOM输出电压 d 轴和 q 轴分量的参考值 u_{cd}^{*}、u_{cq}^{*}。

3　具有延时补偿的LADRC设计

3.1　LADRC传统控制结构

LADRC结构由跟踪微分器（tracking differentiator，TD）、线性扩张状态观测器（linear extended state observer，LESO）、线性误差反馈（linear state error feedback，LSEF）三部分组成。LESO输出系统状态变量估计值 z_1、z_2、…、z_n 和总扰动估计值 z_{n+1}，LSEF基于状态误差 e_1、e_2、…、e_n 通过合适的线性组合计算出信号 u_0。设 n 阶被控对象如下：

$$y^{(n)}=b_0u+f \tag{3}$$

式中：f 为总扰动，包括内部扰动和外部扰动；u 为LADRC输出控制量；b_0 为与受控对象相关的参数；y 为被控对象实际输出量。

构造LESO如下：

$$\begin{cases}\dot{z}_1=z_2-\beta_1(z_1-y)\\ \dot{z}_2=z_3-\beta_2(z_1-y)\\ \vdots\\ \dot{z}_n=z_{n+1}-\beta_n(z_1-y)+b_0u\\ \dot{z}_{n+1}=-\beta_{n+1}(z_1-y)\end{cases} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{z}=[\,z_1\ \ z_2\ \ \cdots\ \ z_n\ \ z_{n+1}\,]^{\mathrm{T}}$ 为LESO对状态变量的观测值；$\boldsymbol{\beta}=[\,\beta_1\ \ \beta_2\ \ \cdots\ \ \beta_n\ \ \beta_{n+1}\,]^{\mathrm{T}}$ 为LESO增益。当 $\boldsymbol{\beta}$ 中元素值配置得当时，观测值将会接近真实值，即 $z_1\to y$，$z_2\to\dot{y}$，…，$z_{n+1}\to f$，故LESO可以估计总扰动。通过LSEF环节，最终LADRC的输出控制量 u 为：

$$u=\frac{k_{\mathrm{p}}(v-z_1)-k_{\mathrm{d}}z_2-\cdots-k_{\mathrm{d}(n-2)}z_n-z_{n+1}}{b_0} \tag{5}$$

式中：k_{p}、k_{d}、…、$k_{\mathrm{d}(n-2)}$ 为LSEF控制增益；v 为目标参考值。

LADRC参数可由极点配置法得到，将LESO和LSEF两部分的参数简化为2个带宽，即LESO的观测带宽 ω_{g} 和LSEF的控制带宽 ω_{c}。一阶LADRC的LESO特征方程 $\lambda_1(s)$ 和LSEF特征方程 $\gamma_1(s)$ 分别为：

$$\begin{cases}\lambda_1(s)=s^2+\beta_{1,1}s+\beta_{2,1}=(s+\omega_{\mathrm{g},1})^2\\ \gamma_1(s)=s+k_{\mathrm{p},1}=s+\omega_{\mathrm{c},1}\end{cases} \tag{6}$$

式中：$\omega_{\mathrm{g},1}$、$\omega_{\mathrm{c},1}$ 分别为一阶LADRC的LESO观测带宽、LSEF的控制带宽；$\beta_{1,1}$、$\beta_{2,1}$ 为一阶LADRC的LESO增益；$k_{\mathrm{p},1}$ 为一阶LADRC的LSEF控制增益。由式(6)可得一阶LADRC的控制参数为：

$$\begin{cases}\beta_{1,1}=2\omega_{\mathrm{g},1}\\ \beta_{2,1}=\omega_{\mathrm{g},1}^2\\ k_{\mathrm{p},1}=\omega_{\mathrm{c},1}\end{cases} \tag{7}$$

类似地，二阶LADRC的控制参数为：

$$\begin{cases}\beta_{1,2}=3\omega_{\mathrm{g},2}\\ \beta_{2,2}=3\omega_{\mathrm{g},2}^2\\ \beta_{3,2}=\omega_{\mathrm{g},2}^3\\ k_{\mathrm{p},2}=\omega_{\mathrm{c},2}^2\\ k_{\mathrm{d},2}=2\omega_{\mathrm{c},2}\end{cases} \tag{8}$$

式中：$\omega_{\mathrm{g},2}$、$\omega_{\mathrm{c},2}$ 分别为二阶LADRC的LESO观测带宽、LSEF的控制器带宽；$\beta_{1,2}$、$\beta_{2,2}$、$\beta_{3,2}$ 为二阶LADRC

的LESO增益；$k_{p,2}$、$k_{d,2}$为二阶LADRC的LSEF控制增益。

3.2 考虑延时的改进型LADRC

STATCOM作为被控对象，控制输入信号u到实际输出信号y过程中，存在PWM延时、采样和计算延时等，即$y(t+T_d)$与$u(t)$之间存在时间误差T_d。将$\Delta\omega_r$引入STATCOM控制中，由于风电场与STATCOM之间存在一定的电气距离，信号传输延时也需要考虑。LESO的2个输入信号y和u时间轴上的不匹配，将会影响LESO对干扰和系统状态估计的准确性。

考虑延时的改进型LADRC结构如图4所示。在信号u输入LESO之前加入延时模块，使信号y和u在时间上达到同步，提高LADRC控制器在时滞系统中的控制精度。

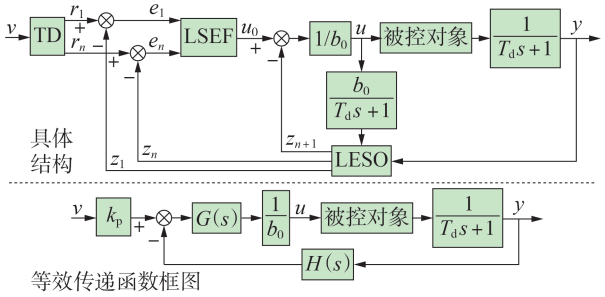


图4 考虑延时的改进型LADRC结构

Fig.4 Improved LADRC structure considering time delay

联立式(4)、(5)、(7)、(8)可推导出改进型LADRC输出控制信号u的一阶、二阶LADRC传递函数分别如式(9)、(10)所示。

$$\begin{cases} u_1=G_1(s)(k_{p,1}v-H_1(s)y)/b_0 \\ G_1(s)=\dfrac{(s+\omega_{g,1})^2(T_ds+1)}{(s+\omega_{g,1})^2(T_ds+1)+\omega_{c,1}s-\omega_{g,1}^2} \\ H_1(s)=\dfrac{(2\omega_{c,1}\omega_{g,1}+\omega_{g,1}^2)s+\omega_{c,1}\omega_{g,1}^2}{(s+\omega_{g,1})^2(T_ds+1)} \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} u_2=G_2(s)(k_{p,2}v-H_2(s)y)/b_0 \\ G_2(s)=\dfrac{(s+\omega_{g,2})^3(T_ds+1)}{(s+\omega_{g,2})^3(T_ds+1)+2\omega_{c,2}s^2+\gamma-\omega_{g,2}^3} \\ \gamma=(\omega_{c,2}^2+6\omega_{g,2}\omega_{c,2})s \\ H_2(s)=\dfrac{\eta+\mu+\omega_{c,2}^2\omega_{g,2}^3}{(s+\omega_{g,2})^3(T_ds+1)} \\ \eta=(3\omega_{c,2}^2\omega_{g,2}+6\omega_{c,2}\omega_{g,2}^2+\omega_{g,2}^3)s^2 \\ \mu=(3\omega_{c,2}^2\omega_{g,2}^2+2\omega_{c,2}\omega_{g,2}^3)s \end{cases} \tag{10}$$

4 STATCOM控制器设计

附加阻尼控制器LADRC$_5$采用二阶形式，$\Delta\omega_r$从双馈风电场引入STATCOM过程中需考虑采样延时T_s以及信号传输延时T_c，将延时近似等效为一阶惯性环节，即$1/[(T_s+T_c)s+1]$，在u_{er}引入LESO之前加延时环节$1/[(T_s+T_c)s+1]$，控制器具体表达式见附录A式(A1)。

由式(1)可知，STATCOM交流侧数学模型为一阶系统，故电流内环控制器LADRC$_2$和LADRC$_4$均采用一阶形式。dq轴电流内环控制器设计原理和参数均相同，以d轴为例，电流内环控制结构见附录A图A1，控制器设计过程见附录A式(A2)、(A3)。

d轴电压外环控制器LADRC$_1$对应电压u_{dc}平衡，由式(2)可知STATCOM直流侧数学模型为一阶系统，故LADRC$_1$采用一阶形式，控制结构见附录A图A2，具体表达式见附录A式(A4)、(A5)。类似地，q轴电压外环LADRC$_3$设计过程见附录A式(A6)。

PLL为同步系统提供跟踪相位θ_{pll}，发生SSCI时PLL输入电压中含有大量谐波，会使输出相位的误差增大。用一阶LADRC替换PLL中原有的PI控制器(后文简写为“PLL_LADRC”)，LADRC会对谐波量进行估计并补偿，消除系统中的谐波影响，增加同步系统的跟踪精确度，PLL_LADRC控制原理见附录A图A3。PLL_LADRC设计过程见附录A式(A7)—(A11)。

5 STATCOM的SSCI抑制机理

5.1 STATCOM抑制SSCI阻抗机理

含STATCOM双馈风电场经串补的并网系统在次同步频率f_{er}下等效阻抗模型如图5所示。图中：R_r、R_{RSC}分别为风力发电机转子绕组和RSC的等效电阻；R_s为定子绕组与风电场出口升压变的总电阻；L_r、L_s、L_m分别为转子、定子的漏感以及互感，由于$L_m \ll L_r$、$L_m \ll L_s$，常忽略含L_m的线路；Δu_r为RSC在次同步扰动下输出的扰动电压；s_r为次同步频率下转子转差率，有$s_r=(\omega_{er}-\omega_r)/\omega_{er}$，$\omega_{er}$为次同步角频率，$\omega_r$为转子角频率；$Z_G$为DFIG风电场等效阻抗；$Z_L$为输电网络等效阻抗；$R_m$、$X_m$分别为STATCOM等效电阻和电抗。

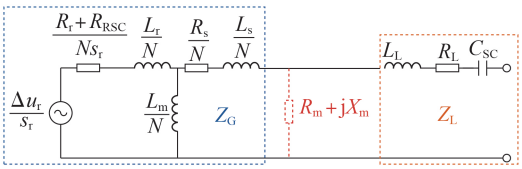


图5 含STATCOM的双馈风电场经串补的输电阻抗模型

Fig.5 Transmission impedance model of doubly-fed wind farm with STATCOM through series compensation

输电网络中线路与变压器的等效阻抗电路由电阻R_L、电感L_L及串补电容C_{SC}组成。未加入STATCOM时系统在次同步频率下的等效阻抗$Z_{eq}=R_{eq}+jX_{eq}$可

表示为：

$$\begin{cases} R_{eq}=R_G+R_L=\dfrac{R_r+R_{RSC}}{Ns_r}+\dfrac{R_s}{N}+R_L \\ X_{eq}=j\left[\dfrac{\omega_{er}(L_r+L_s)}{N}+\omega_{er}L_L-\dfrac{1}{\omega_{er}C_{sc}}\right] \\ Z_G=R_G+jX_G=\left(\dfrac{R_r+R_{RSC}}{Ns_r}+\dfrac{R_s}{N}\right)+j\omega_{er}\left(\dfrac{L_r}{N}+\dfrac{L_s}{N}\right) \\ Z_L=R_L+j\left(\omega_{er}L_L-\dfrac{1}{\omega_{er}C_{SC}}\right) \end{cases} \tag{11}$$

式中：R_G、X_G分别为DFIG风电场等效电阻和电抗。一般$\omega_{er}<\omega_r$，则$s_r<0$，此时转子呈现负电阻特性，即$(R_r+R_{RSC})/(Ns_r)<0$；当转子的负电阻特性使系统整体电阻为负时，$R_{eq}<0$；此时若系统受到扰动，则由于系统整体呈现负阻尼，将引发持续发散振荡，进而造成严重SSCI事故。

STATCOM附加SSDC可以增加系统在次同步频率下的正阻抗，如图5所示，STATCOM等效为并联可变阻抗$Z_m=R_m+jX_m$，投入STATCOM后系统整体等效电阻R'_{eq}为：

$$\begin{cases} R'_{eq}=\dfrac{R_G}{AB}+\dfrac{R_m}{B}+R_L \\ A=R_G^2+\omega_{er}^2X_G^2>0 \\ B=(R_G/A+R_m)^2+(X_m/\omega_{er}-\omega_{er}X_G/A)^2 \end{cases} \tag{12}$$

当R_m满足式(13)中的条件时，可抵消DFIG的负阻抗效应，将系统整体等效电阻R'_{eq}抬升至正值，系统受到扰动时可逐渐收敛。

$$R_m>\frac{|R_G|}{A} \tag{13}$$

5.2　STATCOM等效建模

由附录A式(A3)、(A5)、(A6)可得，d、q轴电压外环和电流内环传递函数分别为：

$$\begin{cases} i_{cd}^*=\dfrac{1}{b_{0,ud}}G_{1,ud}(s)(k_{p,ud}u_{dc}^*-H_{1,ud}(s)u_{dc}) \\ i_{cq}^*=\dfrac{1}{b_{0,uq}}G_{1,uq}(s)\left[k_{p,uq}(u_p^*+u_{er})-H_{1,uq}(s)u_p\right] \\ u_{cd}^*=u_{pd}^c-\dfrac{1}{b_{0,id}}G_{1,id}(s)(k_{p,id}i_{cd}^*-H_{1,id}(s)i_{cd}^c) \\ u_{cq}^*=u_{pq}^c-\dfrac{1}{b_{0,iq}}G_{1,iq}(s)(k_{p,iq}i_{cq}^*-H_{1,iq}(s)i_{cq}^c) \end{cases} \tag{14}$$

式中：$b_{0,ud}$、$b_{0,uq}$和$k_{p,ud}$、$k_{p,uq}$和$G_{1,ud}(s)$、$G_{1,uq}(s)$以及$H_{1,ud}(s)$、$H_{1,uq}(s)$分别为d、q轴电压外环LADRC的内部控制参数$b_{0,u}$和控制增益$k_{p,u}$以及传递函数分量$G_{1,u}(s)$和$H_{1,u}(s)$的表达形式；$b_{0,id}$、$b_{0,iq}$和$k_{p,id}$、$k_{p,iq}$和$G_{1,id}(s)$、$G_{1,iq}(s)$以及$H_{1,id}(s)$、$H_{1,iq}(s)$分别为d、q轴电流内环LADRC的内部控制参数$b_{0,i}$、控制增益$k_{p,i}$、传递函数分量$G_{1,i}(s)$和$H_{1,i}(s)$的表达形式。

由式(14)可推导出STATCOM控制系统的小信号模型，如式(15)所示。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix}\Delta i_{cd}^*\\ \Delta i_{cq}^*\end{bmatrix}=\boldsymbol{F}_1\begin{bmatrix}0\\ \Delta u_{er}\end{bmatrix}-\boldsymbol{F}_2\begin{bmatrix}\Delta u_{dc}\\ \Delta u_p\end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix}\Delta u_{cd}^*\\ \Delta u_{cq}^*\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\Delta u_{pd}^c\\ \Delta u_{pq}^c\end{bmatrix}-\boldsymbol{F}_3\begin{bmatrix}\Delta i_{cd}^*\\ \Delta i_{cq}^*\end{bmatrix}+\boldsymbol{F}_4\begin{bmatrix}\Delta i_{cd}^c\\ \Delta i_{cq}^c\end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix}\Delta u_{cd}\\ \Delta u_{cq}\end{bmatrix}=\boldsymbol{F}_{delay}\begin{bmatrix}\Delta u_{cd}^*\\ \Delta u_{cq}^*\end{bmatrix} \end{cases} \tag{15}$$

式中：$\Delta u_p=(u_{pd0}\Delta u_{pd}+u_{pq0}\Delta u_{pq})/u_{p0}$，将其改写为矩阵形式$\boldsymbol{F}_5$，矩阵$\boldsymbol{F}_1$—$\boldsymbol{F}_5$、$\boldsymbol{F}_{delay}$详细表达式如附录A式(A12)所示，变量下标0表示对应变量的稳态值，变量前方Δ表示对应变量的小信号分量。

对式(1)、(2)进行拉氏变换，建立小信号模型如下：

$$\begin{cases} \begin{bmatrix}\Delta u_{pd}\\ \Delta u_{pq}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\Delta u_{cd}\\ \Delta u_{cq}\end{bmatrix}+\underbrace{\begin{bmatrix}R_c+sL_c & -\omega_0L_c\\ \omega_0L_c & R_c+sL_c\end{bmatrix}}_{\boldsymbol{F}_6}\begin{bmatrix}\Delta i_{cd}\\ \Delta i_{cq}\end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix}\Delta u_{dc}\\ 0\end{bmatrix}=\underbrace{\frac{3}{2Cu_{dc}s}\begin{bmatrix}i_{cd0} & i_{cq0}\\ 0 & 0\end{bmatrix}}_{\boldsymbol{F}_7}\begin{bmatrix}\Delta u_{cd}\\ \Delta u_{cq}\end{bmatrix}+ \\ \qquad\underbrace{\frac{3}{2Cu_{dc}s}\begin{bmatrix}u_{cd0} & u_{cq0}\\ 0 & 0\end{bmatrix}}_{\boldsymbol{F}_8}\begin{bmatrix}\Delta i_{cd}\\ \Delta i_{cq}\end{bmatrix} \end{cases} \tag{16}$$

结合式(A10)、(A11)、(15)、(16)可推导出STATCOM的小信号导纳矩阵：

$$\begin{bmatrix}\Delta i_{cd}\\ \Delta i_{cq}\end{bmatrix}=\boldsymbol{Y}_{stc}\begin{bmatrix}\Delta u_{pd}\\ \Delta u_{pq}\end{bmatrix}+\boldsymbol{Y}_{er}\begin{bmatrix}0\\ \Delta u_{er}\end{bmatrix} \tag{17}$$

式中：$\boldsymbol{Y}_{stc}$、$\boldsymbol{Y}_{er}$的详细表达式见附录A式(A13)。

6　SSCI抑制效果仿真验证

利用MATLAB / Simulink搭建了图1所示的含STATCOM的双馈风电场经串补线路并网的等值模型，来验证上述SSCI抑制策略的有效性。

6.1　控制参数对STATCOM等效阻抗的影响规律

STATCOM等效为次同步频率下电阻值为正的阻抗，并联在双馈风电场PCC处，将系统整体阻抗抬升至正值。STATCOM等效阻抗与控制参数密切相关，依据上述推导得到全改进型LADRC下的STATCOM小信号导纳矩阵，进一步研究参数对STATCOM等效阻抗的影响规律。增大或减小附加阻尼控制器、电压外环和电流内环LADRC参数，参数变化对STATCOM等效阻抗的影响规律见附录B图B1。由图可知：附加阻尼控制器参数的变化对阻抗的影响最为显著，电压外环控制参数对阻抗影响不大；电流内环控制器LADRC中控制带宽对阻抗的影响大于观测带宽。

6.2　全改进型LADRC与部分使用LADRC、全PI控制器的STATCOM系统等效阻抗对比

基于全改进型LADRC、全PI控制器、部分使用

改进型LADRC(附加阻尼控制+改进型LADRC、电压电流双环控制+改进型LADRC)抑制策略,等效阻抗频率特性曲线对比如图6所示。

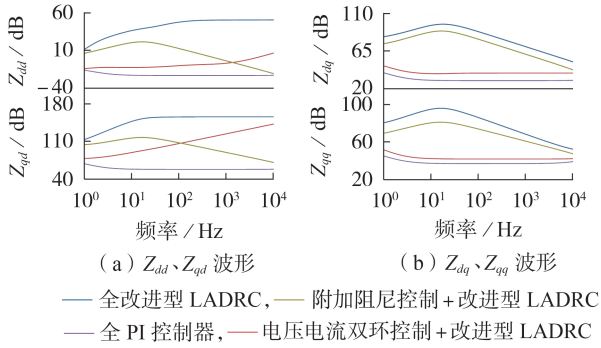


图6 不同抑制策略等效阻抗对比

Fig.6 Comparison of equivalent impedance among different suppression strategies

由图6可知:相较于其他抑制策略,采用基于全改进型LADRC的抑制策略时阻抗分量幅值Z_{dd}、Z_{dq}、Z_{qd}、Z_{qq}均较高;2种部分使用改进型LADRC的抑制策略虽然在一定程度上可以增大STATCOM等效阻抗,但是幅值增量没有全改进型LADRC抑制策略明显。因此全改进型LADRC系统的稳定裕度和鲁棒性更强。

6.3 抑制策略效果验证

分别对比基于PI控制器、传统LADRC以及改进型LADRC的SSCI抑制策略的抑制效果。DFIG处于额定运行状态,风速为额定风速15 m/s,在6 s时投入串补电容,3种抑制策略下DFIG输出响应的仿真结果如图7、8所示。

由图7可知,当输电线路的串补度突变为40%时,DFIG输出有功功率P、无功功率Q波形将会在此扰动下发生持续振荡且振荡没有衰减,波形中出现大量次同步分量。基于PI控制器、传统LADRC和改进型LADRC抑制策略均可以使次同步分量逐渐衰减。但在改进型LADRC抑制策略作用下,相比传统LADRC和PI控制器,DFIG输出有功功率和无功

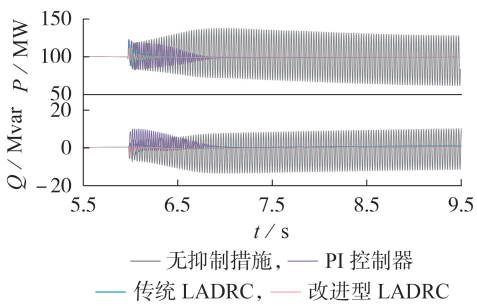


图7 不同抑制策略DFIG输出有功、无功响应曲线

Fig.7 Output active and reactive power response curves of DFIG under different suppression strategies

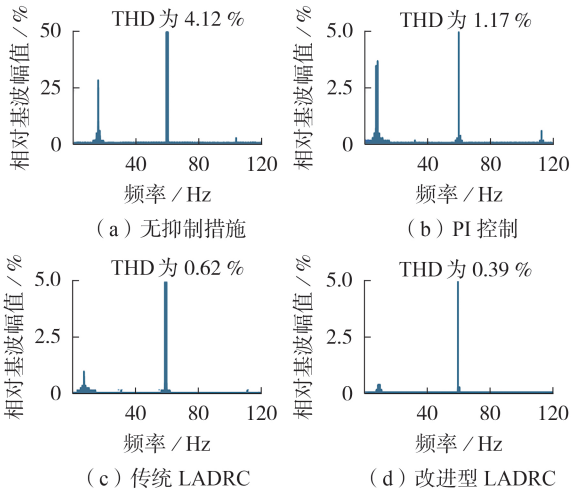


图8 不同抑制策略下定子电流THD

Fig.8 THD of stator current under different suppression strategies

功率振荡幅度更小,收敛速度更快。由图8可知,采用改进型LADRC抑制策略后,定子电流总谐波畸变率(total harmonic distortion,THD)由PI控制下的1.17%和传统LADRC下的0.62%,下降到0.39%。由此表明,基于改进型LADRC的抑制策略可以有效抑制系统SSCI,相较于PI控制和传统LADRC,动态追踪速度更快,有更强的暂态和稳态响应能力。

6.4 鲁棒性测试

6.4.1 串补度变化

系统在稳定运行状态下,6 s时在线路中投放串补度为40%、60%和80%的串补电容,保持控制器参数不变,得到在不同串补度下基于改进型LADRC、传统LADRC、PI控制器的抑制策略对SSCI抑制能力的对比结果,如图9所示。

由图9可知:串补度越大,系统的振荡幅度也越大,抑制策略对振荡的抑制速度也会有一定程度的减慢;各抑制策略在不同串补度下,使DFIG输出功率振荡逐渐趋于收敛,但在PI控制器下,DFIG输出功率在9.5 s仍存在小幅度振荡,且随着串补度的增加振荡抑制效果也减弱。在保持参数不变的条件下,PI控制器在一段时间内使DFIG输出的有功功率降低,且串补度越大,功率降低越明显。传统LADRC在不同串补度下使振荡逐渐趋于收敛且不会影响DFIG的输出功率,但在振荡逐渐收敛进入稳态的一段时间内,DFIG输出的有功功率仍存在微小振荡,在振荡收敛快速性和扰动估计精准度方面都逊色于改进型LADRC。在实际工程中,我国高压输电串补度集中在35%~45%,基本不能达到80%。因此改进型LADRC可以在参数不变的条件下对不同串补度引发的SSCI进行有效抑制。

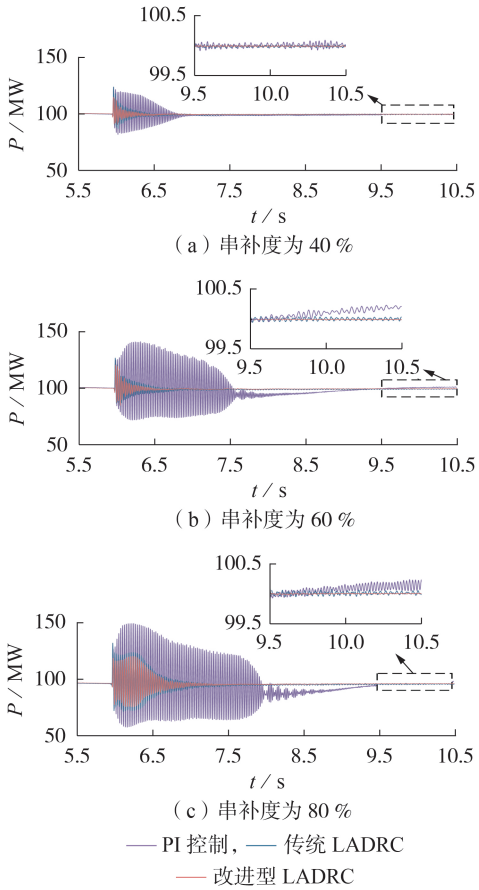


图 9　不同串补度下 DFIG 输出有功功率响应曲线

Fig.9　Output active power response curves of DFIG under different series compensation

6.4.2　风速变化

由于风电场出力具有随机性和时变性，在不同风速下考虑基于改进型 LADRC、PI 控制器的抑制策略对 DFIG 的 SSCI 抑制效果。分别选取风速为 15、12、9 m / s，使 DFIG 稳定运行一段时间，在 6 s 投入补偿度为 40 % 的串补电容，对比分析 2 种抑制策略在不同风速下的 SSCI 抑制效果，如附录 B 图 B2 所示。由图可知：在不同风速下，未投入抑制措施时，双馈风电场经串补输电系统会发生持续性的振荡；改进型 LADRC 不改变控制参数，可以在不同风速下为系统提供正阻尼，DFIG 输出有功功率振荡都可以在大约 0.5 s 内快速收敛并趋于稳定；基于 PI 控制器的抑制策略不改变控制参数，风速越低则抑制效果越弱，当风速为 9 m / s 时抑制策略失效，不能使振荡收敛。

7　结论

针对双馈风电场由串补线路引发的 SSCI 问题，本文提出了基于改进型 LADRC 的 STATCOM 附加阻尼控制，并对系统进行了阻抗建模和仿真分析，所得结论如下：

1）基于全 LADRC 的 STATCOM 控制系统，相比全 PI 控制可以提高系统的追踪速度、对扰动的观测精度以及抗干扰能力，实现 STATCOM 对 SSCI 的快速有效抑制；

2）STATCOM 附加阻尼控制系统的阻抗建模中，SSDC 在电路中等效为受控电压源向系统注入次同步抑制电流，实现系统阻抗重塑，增加了系统在次同步频率下的正阻尼；

3）输电线路串补度、风速等因素都会影响 SSCI 的特性，也会对上述抑制策略的鲁棒性和抗干扰能力提出挑战。

附录见本刊网络版（http://www.epae.cn）。

参考文献：

[1] 薛安成，付潇宇，乔登科，等. 风电参与的电力系统次同步振荡机理研究综述和展望[J]. 电力自动化设备，2020，40(9)：118-128.
XUE Ancheng，FU Xiaoyu，QIAO Dengke，et al. Review and prospect of research on sub-synchronous oscillation mechanism for power system with wind power participation[J]. Electric Power Automation Equipment，2020，40(9)：118-128.

[2] 尹梦雪，刘辉，李蕴红，等. 风电-串补输电系统次同步谐振特性与风电机组数量及线路参数关系研究[J]. 太阳能学报，2021，42(1)：174-179.
YIN Mengxue，LIU Hui，LI Yunhong，et al. Research on impact on sub-synchronous resonance risk from DFIG number and grid structure in Guyuan area[J]. Acta Energiae Solaris Sinica，2021，42(1)：174-179.

[3] SHAIR J，XIE X R，WANG L P，et al. Overview of emerging subsynchronous oscillations in practical wind power systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2019，99：159-168.

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

[5] DAMAS R N，SON Y，YOON M，et al. Subsynchronous oscillation and advanced analysis：a review[J]. IEEE Access，2020，8：224020-224032.

[6] 刘其辉，董楚然，于一鸣. 双馈风电并网系统高频谐振机理及抑制策略[J]. 电力自动化设备，2020，40(9)：163-172.
LIU Qihui，DONG Churan，YU Yiming. High frequency resonance mechanism and suppression strategy of doubly-fed wind power grid-connected system[J]. Electric Power Automation Equipment，2020，40(9)：163-172.

[7] 刘志坚，骆军，梁宁，等. 虚拟同步控制对风电并网系统次同步振荡阻尼影响分析[J]. 电力系统自动化，2023，47(1)：135-142.
LIU Zhijian，LUO Jun，LIANG Ning，et al. Analysis of influence of virtual synchronous control on subsynchronous oscillation damping for grid-connected wind power system[J]. Automation of Electric Power Systems，2023，47(1)：135-142.

[8] 董晓亮，谢小荣，韩英铎，等. 基于定转子转矩分析法的双馈风机次同步谐振机理研究[J]. 中国电机工程学报，2015，35(19)：4861-4869.
DONG Xiaoliang，XIE Xiaorong，HAN Yingduo，et al. Mechanism study of DFIG-related SSR based on separate stator and rotor torque analysis[J]. Proceedings of the CSEE，2015，35(19)：4861-4869.

[9] 李振兴，王振宇，翁汉琍，等. 振荡中心侵入机群场景下的刚性

外推策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(9):110-117.
LI Zhenxing, WANG Zhenyu, WENG Hanli, et al. Inflexible extrapolation strategy when oscillation center into generator group[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 110-117.
[10] 邵冰冰,赵书强,高本锋,等. 基于反馈线性化滑模控制的直驱风电场经柔直并网系统次同步振荡抑制策略[J]. 中国电机工程学报,2021,41(9):3090-3106.
SHAO Bingbing, ZHAO Shuqiang, GAO Benfeng, et al. Sub-synchronous oscillation mitigation strategy of direct-drive wind farms via VSC-HVDC system based on feedback linearization sliding mode control[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3090-3106.
[11] SHAIR J, XIE X R, LI Y H, et al. Hardware-in-the-loop and field validation of a rotor-side subsynchronous damping controller for a series compensated DFIG system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 698-709.
[12] 李志军,刘洋,张家安. 基于双馈风机抗阻比的次同步振荡抑制策略[J]. 电力自动化设备,2022,42(8):140-145,152.
LI Zhijun, LIU Yang, ZHANG Jiaan. Sub-synchronous oscillation mitigation strategy based on DFIG's ratio of reactance to resistance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 140-145, 152.
[13] XU Y H, ZHAO S M, CAO Y P, et al. Understanding sub-synchronous oscillations in DFIG-based wind farms without series compensation[J]. IEEE Access, 2019, 7: 107201-107210.
[14] XIE X R, WANG L, GUO X J, et al. Development and field experiments of a generator terminal subsynchronous damper [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1693-1701.
[15] 张鹏,许涛,毕天姝,等. 用于次同步谐振抑制的注入模态电流的分流规律及补偿装置位置对阻尼效果的影响[J]. 中国电机工程学报,2017,37(21):6313-6319.
ZHANG Peng, XU Tao, BI Tianshu, et al. Distribution rule of injected modal currents in SSR mitigation and effect of compensation device's location on damping performance[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6313-6319.
[16] 王玉芝,王亮,姜齐荣. 基于STATCOM的风电场SSCI附加阻尼抑制策略[J]. 电力系统自动化,2019,43(15):49-55.
WANG Yuzhi, WANG Liang, JIANG Qirong. STATCOM based supplementary damping mitigation strategy for subsynchronous control interaction in wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 49-55.
[17] 李浩志,李景一,杨建军,等. 抑制风电-柔直外送系统次同步振荡的并联VSC型次同步阻尼控制器[J]. 电力自动化设备,2022,42(8):133-139.
LI Haozhi, LI Jingyi, YANG Jianjun, et al. Shunt-VSC subsynchronous damping controller to suppress SSO in wind power connected by flexible DC sending system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 133-139.
[18] 马燕峰,刘会强,俞人楠. 风电场中STATCOM抑制系统功率振荡[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):67-73.
MA Yanfeng, LIU Huiqiang, YU Rennan. Power oscillation suppression based on STATCOM in wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 67-73.
[19] GAO Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference. Denver, CO, USA: IEEE, 2003: 4989-4996.
[20] HE H C, SI T T, SUN L, et al. Linear active disturbance rejection control for three-phase voltage-source PWM rectifier [J]. IEEE Access, 2020, 8: 45050-45060.

作者简介:

刘亚锦(1985—),女,讲师,博士,主要研究方向为电力设备故障诊断和状态评估(**E-mail**:liu_yajin@163.com);

廖雨欣(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控制(**E-mail**:498288080@qq.com);

刘志坚(1975—),男,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统稳定与控制(**E-mail**:248400248@qq.com)。

(编辑 王欣竹)

Sub-synchronous oscillation suppression strategy of doubly-fed wind farms with STATCOM based on improved LADRC

LIU Yajin[1], LIAO Yuxin[1], LIU Zhijian[1], YU Chengjun[1], DUAN Xingwei[2]

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: A static synchronous compensator(STATCOM) based on improved linear active disturbance rejection control(LADRC) is proposed to suppress the sub-synchronous oscillation caused by the transmission of doubly-fed wind farms through series compensation lines. The time delay factor is considered in LADRC design, and the mismatch on time axis between inputs caused by the time delay of signal measurement, transmission and other reasons is eliminated in the control calculation. Based on the improved LADRC, the additional dam-ping controller, the voltage outer loop and current inner loop controllers of STATCOM are designed, so that STATCOM can provide positive damping for the system, while enhancing the speed and anti-interference ability of the control system to adapt to the sub-synchronous oscillation conditions. The mechanism of STATCOM suppressing sub-synchronous oscillation is analyzed from the perspective of impedance. The time domain simulation model of the system is built in MATLAB / Simulink, and the simulative results confirm the superiority of the proposed suppression strategy in dynamic performance and anti-interference.

Key words: linear active disturbance rejection control; STATCOM; doubly-fed induction generator; sub-synchronous oscillation; series compensation transmission system

附录 A

1　STATCOM 控制器设计

1.1 附加阻尼控制器 LADRC5 设计

附加阻尼控制器 LADRC5 参考信号 $v=0$， $y=\Delta\omega_{\mathrm{r}}$，控制器输出次同步抑制电压 u_{er}。

$$\begin{cases}\dot{z}_{1,\mathrm{er}}=z_{2,\mathrm{er}}-\beta_{1,\mathrm{er}}(z_{1,\mathrm{er}}-\Delta\omega_{\mathrm{r}})\\ \dot{z}_{2,\mathrm{er}}=z_{3,\mathrm{er}}-\beta_{2,\mathrm{er}}(z_{1,\mathrm{er}}-\Delta\omega_{\mathrm{r}})+\dfrac{b_{0,\mathrm{er}}}{(T_{\mathrm{s}}+T_{\mathrm{c}})s+1}u_{\mathrm{er}}\\ \dot{z}_{3,\mathrm{er}}=-\beta_{3,\mathrm{er}}(z_{1,\mathrm{er}}-\Delta\omega_{\mathrm{r}})\\ u_{0,\mathrm{er}}=-k_{\mathrm{p,er}}z_{1,\mathrm{er}}-k_{\mathrm{d,er}}z_{2,\mathrm{er}}\\ u_{\mathrm{er}}=(u_{0,\mathrm{er}}-z_{3,\mathrm{er}})/b_{0,\mathrm{er}}\\ \quad=-\dfrac{1}{b_{0,\mathrm{er}}}G_{2,\mathrm{er}}(s)H_{2,\mathrm{er}}(s)\Delta\omega_{\mathrm{r}}\end{cases}\tag{A1}$$

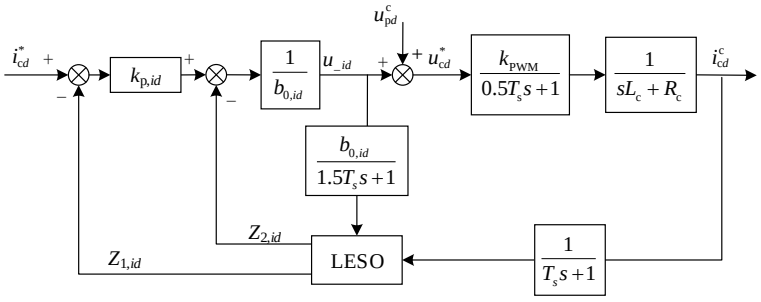


图 A1　电流内环控制结构

Fig.A1　Control structure of current inner loop

1.2 电流内环 LADRC 设计

i_{cd}^{*} 对应于参考值 v，i_{cd}^{c} 对应于实际测量值 y，将两者引入 LADRC2。考虑电流采样延时 $1/(T_{\mathrm{s}}s+1)$ 和脉宽调制延时 $k_{\mathrm{PWM}}/(0.5T_{\mathrm{s}}s+1)$，$k_{\mathrm{PWM}}$ 表示脉宽调制系数。

将式(1)进行规范化处理为如下形式。

$$\frac{\mathrm{d}i_{cd}}{\mathrm{d}t}=\underbrace{-\frac{1}{L_{\mathrm{c}}}}_{b_{0,id}}u_{cd}+\underbrace{\frac{u_{\mathrm{pd}}-R_{\mathrm{c}}i_{cd}}{L_{\mathrm{c}}}+\omega_0 i_{\mathrm{cq}}}_{f_{id}}\tag{A2}$$

由式(1)可知 dq 轴电流之间存在交叉耦合项 $L_{\mathrm{c}}\omega_0 i_{cd/q}$，LADRC 可将耦合项作为内部扰动进行估计并补偿，实现 dq 轴完全解耦。由式(A2)确定 $b_{0,id}=-1/L_{\mathrm{c}}$，扰动量 $f_{id}=\omega_0 i_{\mathrm{cq}}+(u_{\mathrm{pd}}-R_{\mathrm{c}}i_{cd})/L_{\mathrm{c}}$，电流内环控制器 LADRC2 设计如下：

$$\begin{cases}\dot{z}_{1,id}=z_{2,id}-\beta_{1,id}(z_{1,id}-i_{cd}^{\mathrm{c}})+\dfrac{b_{0,id}}{1.5T_{\mathrm{s}}s+1}u_{_id}\\ \dot{z}_{2,id}=-\beta_{2,id}(z_{1,id}-i_{cd}^{\mathrm{c}})\\ u_{_id}=\dfrac{k_{\mathrm{p},id}(i_{cd}^{*}-z_{1,id})-z_{2,id}}{b_{0,id}}\\ \quad=\dfrac{1}{b_{0,id}}G_{1,id}(s)(k_{\mathrm{p},id}i_{cd}^{*}-H_{1,id}(s)i_{cd}^{\mathrm{c}})\end{cases}\tag{A3}$$

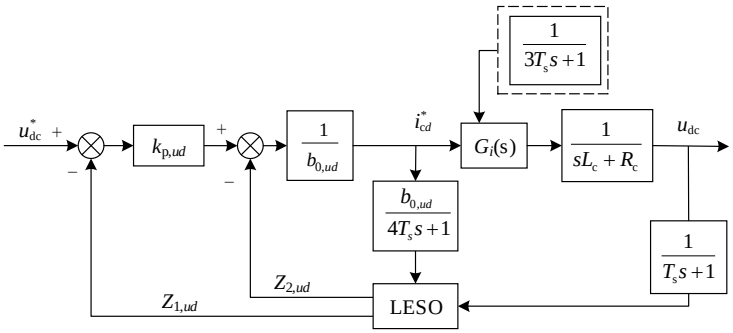


图 A2　电压外环控制结构

Fig.A2　Control structure of DC voltage outer loop

1.3 电压外环 LADRC 设计

令 $v=u_{dc}^*$，$y=u_{dc}$，控制器将输出 d 轴电流内环参考值 i_{cd}^*，将式(2)改写为以下形式。

$$\frac{\mathrm{d}u_{dc}}{\mathrm{d}t}=\underbrace{\frac{3u_{cd}}{2Cu_{dc}}}_{b_{0,ud}}i_{cd}+\underbrace{\frac{3u_{cq}}{2Cu_{dc}}i_{cq}}_{f_{ud}} \tag{A4}$$

由上式可以确定 LADRC$_1$ 内部参数 $b_{0,ud}=3u_{cd}/2Cu_{dc}$，以及扰动量 $f_{ud}=3u_{cq}i_{cq}/2Cu_{dc}$。电流内环计算延时，可近似为 $1/(3T_s s+1)$，加上采样延时 $1/(T_s s+1)$，则控制器 LADRC$_1$ 设计如下：

$$\begin{cases}\dot{z}_{1,ud}=z_{2,ud}-\beta_{1,ud}(z_{1,ud}-u_{dc})+\dfrac{b_{0,ud}}{4T_s s+1}i_{cd}^*\\ \dot{z}_{2,ud}=-\beta_{2,ud}(z_{1,ud}-u_{dc})\\ i_{cd}^*=\dfrac{k_{p,ud}(u_{dc}^*-z_{1,ud})-z_{2,ud}}{b_{0,ud}}\\ \qquad=\dfrac{1}{b_{0,ud}}G_{1,ud}(s)(k_{p,ud}u_{dc}^*-H_{1,ud}(s)u_{dc})\end{cases} \tag{A5}$$

q 轴电压外环 LADRC$_3$ 中，令 $v=u_p^*+u_{er}$、$y=u_p$，控制器输出量为 q 轴电流内环参考值 i_{cq}^*，类似地 q 轴电压外环 LADRC$_3$ 设计如下：

$$\begin{cases}\dot{z}_{1,uq}=z_{2,uq}-\beta_{1,uq}(z_{1,uq}-u_p)+\dfrac{b_{0,uq}}{4T_s s+1}i_{cq}^*\\ \dot{z}_{2,uq}=-\beta_{2,uq}(z_{1,uq}-u_p)\\ i_{cq}^*=\dfrac{k_{p,uq}(u_p^*+u_{er}-z_{1,uq})-z_{2,uq}}{b_{0,uq}}\\ \qquad=\dfrac{1}{b_{0,uq}}G_{1,uq}(s)\left[k_{p,uq}(u_p^*+u_{er})-H_{1,uq}(s)u_p\right]\end{cases} \tag{A6}$$

1.4 PLL_LADRC 设计

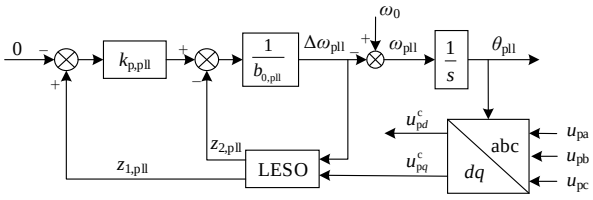


图 A3　PLL_LADRC 控制原理

Fig.A3　PLL_ LADRC control mechanism

图 A3 中，PLL_LADRC 控制器的参考输入 v 设置为 0，y 对应于 u_{pq}^c，输出量为 $\Delta\omega_{pll}$，被控对象的微分方程可表示为：

$$u_{pq}^{c}=U_{pq}^{c}(-\frac{\Delta\omega_{pll}}{s}+\frac{\omega_0}{s})\Rightarrow\frac{\mathrm{d}u_{pq}^{c}}{\mathrm{d}t}=-U_{pq}^{c}\Delta\omega_{pll}+U_{pq}^{c}\omega_0 \tag{A7}$$

由式(A7)可得 $b_{0,pll}=-U_{pq}^{c}$、 $f_{pll}=U_{pq}^{c}\omega_0$，由此构建 PLL_LADRC 控制器如下：

$$\begin{cases}\dot{z}_{1,pll}=z_{2,pll}-\beta_{1,pll}(z_{1,pll}-u_{pq}^{c})+b_{0,pll}\Delta\omega_{pll}\\ \dot{z}_{2,pll}=-\beta_{2,pll}(z_{1,pll}-u_{pq}^{c})\\ \Delta\omega_{pll}=\dfrac{k_{p,pll}z_{1,pll}-z_{2,pll}}{b_{0,pll}}\\ \qquad\quad=\underbrace{\dfrac{1}{b_{0,pll}}G_{1,pll}(s)H_{1,pll}(s)}_{F_{pll}}u_{pq}^{c}\end{cases} \tag{A8}$$

$\Delta\theta_{pll}$ 是 PLL 带来的 θ_{pll} 与 θ_0 之间的误差角，Δu_{pq} 与 $\Delta\theta_{pll}$ 的传递函数表示为：

$$\Delta\theta_{pll}=\underbrace{\frac{F_{pll}(s)}{s+u_{pd0}F_{pll}(s)}}_{G_{pll}(s)}\Delta u_{pq} \tag{A9}$$

由于 $\Delta\theta_{p11}$ 角度趋近于 0，则有近似关系 $\cos\Delta\theta_{pll}\approx1$， $\sin\Delta\theta_{pll}\approx\Delta\theta_{pll}$。结合式(A9)，$[u_{pd}\quad u_{pq}]^{T}$ 与 $[u_{pd}^{c}\quad u_{pq}^{c}]^{T}$ 小信号模型近似转化关系为：

$$\begin{bmatrix}\Delta u_{pd}^{c}\\ \Delta u_{pq}^{c}\end{bmatrix}\approx\underbrace{\begin{bmatrix}1 & G_{pll}(s)u_{pq0}\\ 0 & 1-G_{pll}(s)u_{pd0}\end{bmatrix}}_{\boldsymbol{F}_{VSS}}\begin{bmatrix}\Delta u_{pd}\\ \Delta u_{pq}\end{bmatrix} \tag{A10}$$

CSS 结构与 VSS 类似，同理，CSS 中 $[i_{pd}\quad i_{pq}]^{T}$ 与 $[i_{pd}^{c}\quad i_{pq}^{c}]^{T}$ 的小信号模型转换关系如下：

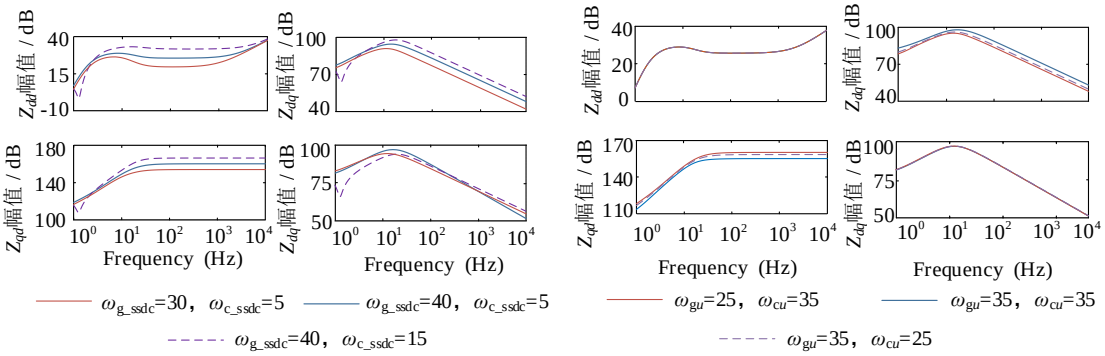
$$\begin{bmatrix}\Delta i_{cd}^{c}\\ \Delta i_{cq}^{c}\end{bmatrix}\approx\begin{bmatrix}\Delta i_{cd}\\ \Delta i_{cq}\end{bmatrix}+\underbrace{\begin{bmatrix}0 & G_{pll}(s)i_{cq0}\\ 0 & -G_{pll}(s)i_{cd0}\end{bmatrix}}_{\boldsymbol{F}_{CSS}}\begin{bmatrix}\Delta u_{pd}\\ \Delta u_{pq}\end{bmatrix} \tag{A11}$$

2　STATCOM 等效建模

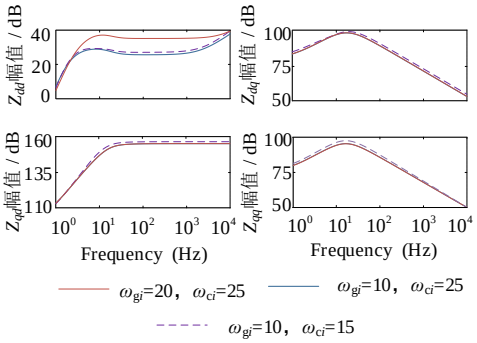
$$\begin{cases}\boldsymbol{F}_1=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & \dfrac{G_{1,uq}(s)k_{p,uq}}{b_{0,uq}}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{F}_2=\begin{bmatrix}\dfrac{G_{1,ud}(s)H_{1,ud}(s)}{b_{0,ud}} & 0\\ 0 & \dfrac{G_{1,uq}(s)H_{1,uq}(s)}{b_{0,uq}}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{F}_3=\begin{bmatrix}\dfrac{G_{1,id}(s)k_{p,id}}{b_{0,id}} & 0\\ 0 & \dfrac{G_{1,iq}(s)k_{p,iq}}{b_{0,iq}}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{F}_4=\begin{bmatrix}\dfrac{G_{1,id}(s)H_{1,id}(s)}{b_{0,id}} & 0\\ 0 & \dfrac{G_{1,iq}(s)H_{1,iq}(s)}{b_{0,iq}}\end{bmatrix}\\ \begin{bmatrix}0\\ \Delta u_p\end{bmatrix}=\underbrace{\begin{bmatrix}0 & 0\\ \dfrac{u_{pd0}}{u_{p0}} & \dfrac{u_{pq0}}{u_{p0}}\end{bmatrix}}_{\boldsymbol{F}_5}\begin{bmatrix}\Delta u_{pd}\\ \Delta u_{pq}\end{bmatrix};\ F_{delay}=\dfrac{k_{pwm}}{0.5T_s s+1}\end{cases} \tag{A12}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{Y}_{\text{stc}} = \dfrac{\boldsymbol{I} - F_{\text{delay}}\left[\boldsymbol{F}_{\text{VCC}} + \boldsymbol{F}_3\boldsymbol{F}_2(\boldsymbol{F}_7 + \boldsymbol{F}_5) + \boldsymbol{F}_4\boldsymbol{F}_{\text{CSS}}\right]}{F_{\text{delay}}\left[\boldsymbol{F}_4 + \boldsymbol{F}_3\boldsymbol{F}_2(\boldsymbol{F}_8 - \boldsymbol{F}_7\boldsymbol{F}_6)\right] + \boldsymbol{F}_6} \\ \boldsymbol{Y}_{\text{er}} = \dfrac{F_{\text{delay}}\boldsymbol{F}_3\boldsymbol{F}_1}{F_{\text{delay}}\left[\boldsymbol{F}_4 + \boldsymbol{F}_3\boldsymbol{F}_2(\boldsymbol{F}_8 - \boldsymbol{F}_7\boldsymbol{F}_6)\right] + \boldsymbol{F}_6} \end{cases} \tag{A13}$$

附录 B



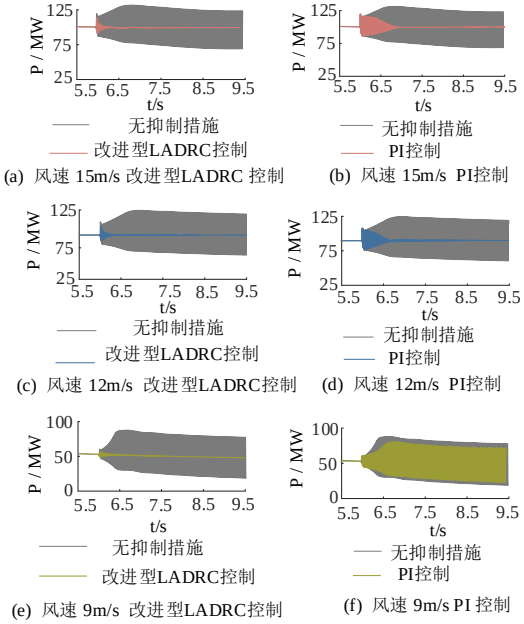
(a) 不同附加阻尼控制参数下STATCOM阻抗　　(b) 不同外环电压控制参数下STATCOM阻抗



（c） 不同内环电流控制参数下STATCOM阻抗

图 B1　参数对 STATCOM 等效阻抗的影响规律

Fig.B1　Influence of parameters on equivalent impedance of STATCOM



(a) 风速 15m/s 改进型LADRC 控制　(b) 风速 15m/s PI控制

(c) 风速 12m/s 改进型LADRC控制　(d) 风速 12m/s PI控制

(e) 风速 9m/s 改进型LADRC控制　(f) 风速 9m/s PI 控制

图 B2　不同风速下 DFIG 输出有功功率响应曲线

Fig.B2　Response curve of DFIG output active power under different wind speeds