

风电场中 STATCOM 抑制系统功率振荡

马燕峰, 刘会强, 俞人楠

(华北电力大学 电气与工程学院, 河北 保定 071003)

摘要:含虚拟惯量控制的风电场给系统的小干扰稳定带来了新的影响,在此背景下,研究利用风电场配置的静止同步补偿器(STATCOM)附加阻尼控制对电力系统低频振荡的抑制。利用阻尼转矩法分析了虚拟惯量控制对风电并网系统阻尼特性的影响,提出利用风电场中配置的 STATCOM 增强系统动态稳定的控制策略。基于自抗扰理论设计了 STATCOM 附加阻尼控制器,以改善系统阻尼特性。基于 DIgSILENT 平台搭建典型的 4 机 2 区域系统进行仿真,仿真结果验证了具有附加自抗扰阻尼控制作用的 STATCOM 能有效地阻尼系统功率振荡。

关键词:风电场;虚拟惯量;STATCOM;自抗扰控制;低频振荡

中图分类号:TM 614

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.02.009

0 引言

低频振荡较易发生在弱联系长距离的大型互联电力系统中,其发生后如果不加以控制就会造成系统停电,使国民经济产生巨大损失^[1]。同时,研究表明风力发电机组可以通过改变系统潮流或者与系统进行机电交互作用来影响系统阻尼^[2-3]。电网中风电渗透率的不断提高对系统低频振荡的影响愈加明显,因此风电接入系统后,对低频振荡的阻尼特性和抑制措施进行研究具有重要意义。

近年来,不少学者研究利用风机来抑制系统低频振荡的控制措施。文献[4-5]研究了大容量风电场接入对电网暂态稳定性造成的影响,总结了大容量风电场接入对电网运行造成的不利影响,包括频率波动增大、暂态稳定性变差等。目前,虚拟惯量控制逐渐应用到变速风电机组中以提供系统频率支撑,然而具备惯量后的双馈风电机组动力学特性发生了改变,与系统存在耦合,对其小干扰稳定性产生了影响。文献[6]通过模态分析阐明风电机组在虚拟惯性控制下,系统抑制功率振荡的能力会减弱。因此,在虚拟惯性控制方式下,如何增强系统阻尼等动态特性是提高系统安全运行的重要问题。

在给定的运行方式下,具备基本控制的风电场只能在一定程度上提升系统的阻尼,故风电场常采

用配置无功补偿装置来解决电压稳定问题,其中静止同步补偿器(STATCOM)由于其固有优点可用于改善风电场接入电网的运行条件。且 STATCOM 可以在附加阻尼控制下为系统提供正阻尼,抑制功率振荡,这是只需提供相应阻尼控制策略的经济方案。文献[7]基于自适应控制设计了 STATCOM 附加阻尼控制器,并通过 PSASP 仿真验证了其抑制区域内低频振荡的有效性。文献[8]采用留数方法选择控制器的输入信号,利用 PSS/E 进行时域仿真分析,验证了 STATCOM 附加阻尼控制器的有效性。

本文研究了具备可控惯量的风电机组对系统阻尼特性的影响,并分析了 STATCOM 附加自抗扰控制(ADRC)增强系统阻尼的原理;设计了自抗扰附加阻尼控制器,通过 STATCOM 附加阻尼调节电压以实现阻尼控制;以 IEEE 4 机 2 区域系统为例,验证所提控制策略的有效性。

1 ADRC 原理

自抗扰控制器是一种通过系统输入确定新的控制量的装置^[9],其输入为:系统设定值 v_0 、系统被控输出 y 和控制量 u 。ADRC 独立于被控对象的数学模型,能将所有不确定因素都归结到系统的总扰动而给予补偿,具有控制结构简单、鲁棒性强的优点。自抗扰控制器由跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)、状态误差反馈(NLSEF)和扰动估计补偿组成,其结构如图 1 所示。

a. TD 安排过渡过程跟踪设定值 v_0 ,得到 v_1 及其微分信号 v_2 。

收稿日期:2017-02-23;修回日期:2017-11-16

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016MS86);河北省自然科学基金资助项目(E2017502077)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2016MS86) and the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2017502077)

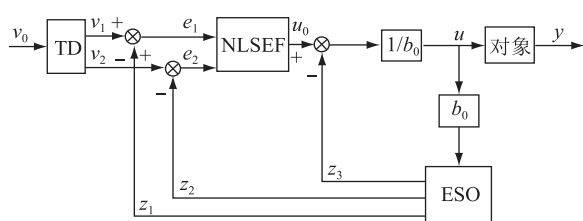


图1 自抗扰控制器典型结构图

Fig.1 Typical structure diagram of auto disturbance rejection controller

$$\begin{cases} e_0 = v_1 - v_0 \\ f_h = f_{\text{han}}(e_0, v_2, r_0, h_0) \\ v_1 = v_1 + hv_2 \\ v_2 = v_2 + hf_h \end{cases} \quad (1)$$

其中, r_0 为速度因子; h_0 为滤波因子; h 为仿真步长; 函数 $f_{\text{han}}(e_0, v_2, r_0, h_0)$ 如式(2)所示。

$$\begin{cases} d = r_0 h_0 \\ d_0 = h_0 d \\ y = e_0 + h_0 v_2 \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r_0 |y|} \\ a = \begin{cases} v_2 + \frac{a_0 - d}{2} \text{sign}(y) & |y| > d_0 \\ v_2 + \frac{y}{h_0} & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ f_{\text{han}} = \begin{cases} -r_0 \text{sign}(a) & |a| > d \\ -r_0 \frac{a}{d} & |a| \leq d \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

b. 系统输出 y 和输入 u 通过 ESO 得到各个状态变量的估计 z_1, z_2, z_3 。

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ f_e = f_{\text{al}}(e, \alpha_1, \delta_1), f_{e1} = f_{\text{al}}(e, \alpha_2, \delta_1) \\ z_1 = z_1 + h(z_2 - \beta_{01}e) \\ z_2 = z_2 + h(z_3 - \beta_{02}f_e + b_0u) \\ z_3 = z_3 - h\beta_{03}f_{e1} \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{\text{al}}(e, \alpha, \delta_1) = \begin{cases} \frac{e}{\delta_1^{1-\alpha}} & |e| \leq \delta_1 \\ |e|^\alpha \text{sign}(e) & |e| > \delta_1 \end{cases} \quad (4)$$

其中, α 为幂函数指数, 一般取 $0 < \alpha \leq 1$; δ 为线性段区间的长度; $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 为一组参数。

c. NLSEF 根据误差 e_1, e_2 控制纯积分器串联型对象的误差反馈控制量 u_0 。

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1, e_2 = v_2 - z_2 \\ u_0 = k(e_1, e_2, p) \end{cases} \quad (5)$$

其中, p 为参数; $k(e_1, e_2, p)$ 为关于 e_1, e_2, p 的函数。

本文采用 $u_0 = -f_{\text{han}}(e_1, e_2, r, h_1)$ 的非线性反馈, 其中 r 为控制量增益, h_1 为快速因子。

d. 扰动补偿过程中, 误差反馈控制量 u_0 通过估计值 z_3 决定控制量。

$$u = u_0 - \frac{z_3}{b_0} \quad (6)$$

其中, b_0 为决定补偿强弱的补偿因子。

对于一阶对象, 在保证控制器性能的前提下, 采用线性比例调节代替 NLSEF, 可以有效降低模型复杂度, 减小计算量。图2给出了结构优化的一阶 ADRC 模型。

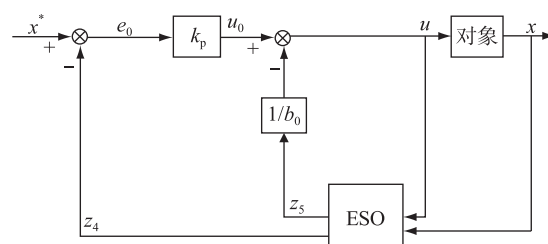


图2 优化后的一阶 ADRC 结构图

Fig.2 Structure diagram of optimized first-order ADRC

在一阶 ADRC 结构中, ESO 只输出了控制对象和未知扰动项的观测值, 减少了非线性反馈运算环节, 便于工程实现。简化后的控制器为:

$$\begin{cases} e = z_4 - x \\ z_4 = z_5 - \beta_1 e + b_0 u \\ z_5 = -\beta_2 e \\ e_0 = x^* - z_1 \\ u_0 = k_p e_0 \\ u = u_0 - z_2/b_0 \end{cases} \quad (7)$$

其中, x^* 为设定值; x 为反馈量; z_4 为 x 的跟踪信号; z_5 为观测值; k_p 为反馈控制律比例系数, 在控制器结构确定的情况下, 主要通过调整 k_p, b_0 来调整系统的控制性能; β_1, β_2 为状态误差的反馈增益, 研究表明^[10], 一般取 $\beta_1 = 1/h, \beta_2 = 1/(5h^2)$ 。文献[9]指出 ADRC 的鲁棒性较好, 对参数 k_p, b_0 的估计要求并不高。参数 k_p 可通过求取模糊控制表, 并从表中查出修正参数得到^[11]; b_0 为控制量 u 作用于系统时的放大系数 b' , 如果 b' 未知, 则需将 b_0 估计到 b' 真值附近, ADRC 对 b' 的估计精度要求很低, 因此很容易得到 b_0 。

2 基于 ADRC 的 STATCOM 附加阻尼控制器设计

2.1 含虚拟惯量控制的风电场对系统阻尼特性的影响

图3为风电机组并入系统的等值电路图。图

中, G_1 为同步发电机; G_2 为无穷大系统; G_3 为双馈风力发电机组 (DFIG) 等值风电场; U_g 为风电场并网点电压; E' 为 G_1 的暂态电动势; U 为 G_2 端电压; θ 为 E' 与 U_g 的相角差; δ 为 E' 与 U 的相角差; x_1 、 x_2 为线路电抗。

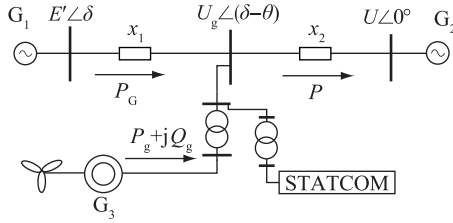


图3 风电并网系统电路图

Fig.3 Circuit diagram of wind power grid-connected system

G_1 的有功和无功输出为:

$$\begin{cases} P_G = \frac{E'U_g}{x_1} \sin \theta \\ Q_G = \frac{E'U_g}{x_1} \cos \theta - \frac{U_g^2}{x_1} \end{cases} \quad (8)$$

同步发电机采用二阶经典模型,其方程为:

$$\begin{cases} H_G \dot{\omega} = P_M - P_G - D(\omega - 1) \\ \dot{\delta} = \omega_0(\omega - 1) \end{cases} \quad (9)$$

其中, H_G 为 G_1 的惯性时间常数; P_G 和 P_M 分别为发电机电磁功率和机械功率; ω_0 为系统额定角速度; D 为阻尼系数。

假设 P_M 恒定,式(9)的小扰动方程为:

$$H_G p^2 \Delta \delta + D p \Delta \delta + \Delta P_G = 0 \quad (10)$$

其中, ΔP_G 为 G_1 有功变化量; p 为微分因子。

由功率平衡关系可知:

$$P = P_G + P_g \quad (11)$$

$$P = \frac{U_g U \sin(\delta - \theta)}{x_2} \quad (12)$$

忽略风机并网点电压变化 ΔU_g 的影响,对式(11)求解小扰动量得:

$$\frac{U_g U \cos(\delta_0 - \theta_0)}{x_2} (\Delta \delta - \Delta \theta) = \frac{E' U_g \cos \theta_0}{x_1} \Delta \theta + \Delta P_g \quad (13)$$

在虚拟惯量控制方式下,引入一个针对系统频率的微分环节,表示为^[12]:

$$\dot{x}_\omega = \frac{1}{T_\omega} (f_{\text{meas}} - x_\omega) \quad (14)$$

其中, x_ω 为引入的中间变量; T_ω 为微分环节时间常数; f_{meas} 为系统频率测量值,由锁相环可测得 $f_{\text{meas}} = \omega_{s_PLL} / (2\pi)$, ω_{s_PLL} 为锁相环角频率。

DFIG 在虚拟惯量作用下,其转子变频器输入的有功功率参考值为:

$$P_{\text{ref}} = P_{\text{opt}} - P_v = P_{\text{opt}} - K_\omega \dot{x}_\omega \quad (15)$$

其中, P_{opt} 为最大功率跟踪点的有功参考值; P_v 为虚拟惯量控制的功率输出信号; K_ω 为虚拟惯量控制环节的比例系数,且 $K_\omega > 0$ 。

为简化分析,虚拟惯量控制的微分环节采用纯微分环节,公共连接点 (PCC) 测得的角频率变化量近似等于发电机角频率的变化量^[12],则 DFIG 输出的有功扰动量为:

$$\Delta P_g = -\Delta P_v = -K_\omega \Delta \dot{\omega}_c = -K_\omega \Delta \dot{\delta} \quad (16)$$

其中, $\Delta \omega_c$ 为 PCC 处角频率变化量的理想值。

将式(13)、(16)代入式(9)得:

$$(H_g + H_\omega) \Delta \ddot{\delta} + D \Delta \dot{\delta} + \frac{a_0 E' U_g x_2 \cos \theta_0}{x_1} \Delta \delta = 0 \quad (17)$$

$$H_\omega = \frac{K_\omega E' a_0 x_2 \cos \theta_0}{U \cos(\delta_0 - \theta_0) x_1} > 0 \quad (18)$$

$$a_0 = \frac{U \cos(\delta_0 - \theta_0) x_1}{E' x_2 \cos \theta_0 + U \cos(\delta_0 - \theta_0) x_1} \quad (19)$$

由式(17)可知,在虚拟惯量控制下,系统特征根右移,这会对电网功率振荡的抑制造成不利影响。并且 K_ω 越大,越不利于系统的稳定。

2.2 STATCOM 附加阻尼控制原理

虚拟惯性控制下的 DFIG 会减弱系统阻尼,不利于系统的稳定运行。且在定功率因数或定电压的无功功率控制方案下,风电场不具备对振荡的阻尼能力^[13]。由无功补偿可知,动态调节注入系统的无功功率可实现对系统功率振荡的阻尼控制^[14-15]。因此,可利用风电场配置的 STATCOM 动态无功调节实现阻尼控制,通过并网点电压为系统提供阻尼支持,抑制功率振荡。

按照瞬时功率理论^[16],STATCOM 输出的无功功率 Q 为:

$$Q = -\frac{3}{2} u_g i_q \quad (20)$$

其中, u_g 为系统侧电压。通过调节 q 轴电流 i_q ,可控制 STATCOM 输出的无功功率。由于 STATCOM 采用双环控制,电压电流量在 d 轴与 q 轴之间存在耦合,故在内环电流的 PI 控制器输出上增加前馈补偿项进行解耦控制,可得:

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R + K_{p2} + \frac{K_{l2}}{s} & 0 \\ 0 & R + K_{p2} + \frac{K_{l2}}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} +$$

$$\left(K_{p2} + \frac{K_{I2}}{s}\right) \begin{bmatrix} i_{dref} \\ i_{qref} \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中, R 为 STATCOM 内部所有损耗的等效电阻; L 为 STATCOM 与电网连接的等效电感; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为 d 、 q 轴电流的参考值; K_{p2} 、 K_{I2} 分别为 STATCOM 内环电流控制中 PI 控制器的比例、积分系数。并网电压控制是通过并网点电压与其参考值进行对比, 产生 q 轴电流参考值 i_{qref} 以稳定并网点电压, i_{qref} 满足:

$$i_{qref} = \left(K_{p1} + \frac{K_{I1}}{s}\right) (U_{gref} - U_g) \quad (22)$$

其中, K_{p1} 、 K_{I1} 分别为外环 q 轴 PI 控制器的比例、积分系数。由简化后的一阶自抗扰控制器可得:

$$\Delta u = -\frac{2k_p b_0 s^2 + (k_p \beta_1 b_0 + \beta_2)s + K_p \beta_2 b_0}{b_0(s^2 + \beta_1 s + \beta_2)} \Delta x \quad (23)$$

STATCOM 在附加 ADRC 的作用下, 可利用动态无功调节改变并网点电压, 为简化分析, 假设 STATCOM 注入电网的无功功率仅引起电网电压 U_g 幅值变化, 变化量为 ΔU_g 。STATCOM 动态调节无功后, G_1 输出有功、无功以及线路传输功率 P 的小扰动量, 均需考虑电网电压的变化。由式(8)可知, G_1 功率变化量为:

$$\begin{cases} \Delta P_G = \frac{E' U_{g0} \cos \theta_0 \Delta \theta + E' \sin \theta_0 \Delta U_g}{x_1} \\ \Delta Q_G = -\frac{E' U_{g0} \sin \theta_0 \Delta \theta - \frac{2U_{g0} - E' \cos \theta_0}{x_1} \Delta U_g}{x_1} \end{cases} \quad (24)$$

其中, U_{g0} 为 U_g 的初始值。 ΔQ_G 等式右侧的第一项取决于 θ 的摆动, 第二项取决于 U_g 的波动, STATCOM 注入系统的无功仅对第二项有影响。结合式(20)~(23), 可得 STATCOM 系统侧无功功率的变化量为:

$$\Delta Q = -\frac{3}{2} U_{g0} a (\Delta U_g + \Delta U) \quad (25)$$

$$a = \frac{K_{p2} K_{p1} s^2 + (K_{p2} K_{I1} + K_{p1} K_{I2})s + K_{I1} K_{I2}}{L s^3 - (R + K_{p2})s^2 - K_{I2}s} \quad (26)$$

令附加阻尼控制器输入为系统角频率变化量 $\Delta \omega$, 由式(24)、(25)得 ΔU_g 为:

$$\Delta U_g = \frac{-3abU_{g0}}{2c + 3aU_{g0}} \Delta \omega \quad (27)$$

$$b = \frac{2k_p b_0 s^2 + (k_p \beta_1 b_0 + \beta_2)s + k_p \beta_2 b_0}{b_0(s^2 + \beta_1 s + \beta_2)} \quad (28)$$

$$c = \frac{E' \cos \theta_0 - 2U_{g0}}{x_1} \quad (29)$$

对线路传输功率 P 求小扰动量可得有功功率的变化量为:

$$\Delta P = \frac{U_{g0} U \cos(\delta_0 - \theta_0)}{x_2} (\Delta \delta - \Delta \theta) + \frac{U \sin(\delta_0 - \theta_0)}{x_2} \Delta U_g \quad (30)$$

结合系统有功功率平衡关系, 有:

$$P = P_G + P_g \quad (31)$$

将式(16)、(30)代入式(24), 并结合式(10), 得到 G_1 的小扰动方程为:

$$\Delta \ddot{\delta} (H_G + H'_\omega) + (D + D_1) \Delta \dot{\delta} + U_{g0} U \cos \theta_0 \cos(\delta_0 - \theta_0) m \Delta \delta = 0 \quad (32)$$

$$H'_\omega = K_\omega x_2 \cos \theta_0 m \quad (33)$$

$$D_1 = \frac{3abmU_{g0} \sin \delta_0}{3aU_{g0} + 2c} \quad (34)$$

$$m = \frac{E'}{x_1 U \cos(\delta_0 - \theta_0) + x_2 E' \cos \theta_0} > 0 \quad (35)$$

由式(32)可知, 考虑到电网电压和变流器无功容量的不足, 可采用风电场配置的 STATCOM 通过无功调节改善系统阻尼, 使系统特征根左移, 从而抑制功率振荡, 增强系统的稳定性。

2.3 STATCOM 附加阻尼控制器设计

在 STATCOM 中引入附加自抗扰阻尼控制器可以对电压进行适当调制, 从而改善系统的阻尼。STATCOM 附加阻尼控制器结构如图 4 所示。图中, U'_{ref} 为参考电压; U' 为 STATCOM 所在节点的电压; Q 为 STATCOM 输出的无功功率。以系统角速度偏差量 $\Delta \omega_s$ 作为自抗扰控制器的输入信号, 然后以经 STATCOM 的 PI 控制得到的无功参考电流 i_{qref} 作为电流内环的控制输入, 从而可以对注入系统的无功功率进行动态调节, 抑制功率振荡。

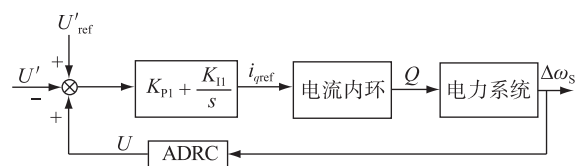


图 4 STATCOM 附加 ADRC 结构图

Fig.4 Structure diagram of STATCOM with additional ADRC

为验证本文所提 ADRC 的效果, 同时设计了图 5 所示的控制器进行对比。

3 仿真分析

以图 6 所示的 IEEE 2 区域 4 机系统^[17] 为例进行分析, 图中风电场在区域 1 中 6 号母线处并网, STATCOM 加装于风电场并网处, 控制器输入信号为

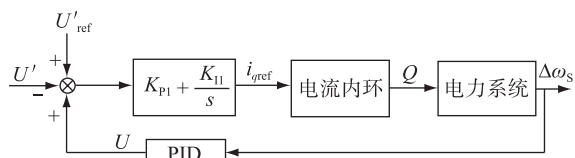


图5 STATCOM 附加 PID 控制结构图

Fig.5 Structure diagram of STATCOM with additional PID control

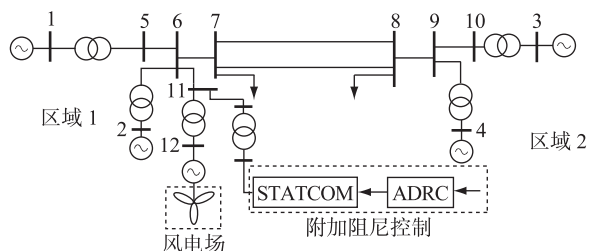


图6 含有风电场和 STATCOM 的 4 机 2 区域系统

Fig.6 4-machine 2-area system with wind farm and STATCOM

系统角速度偏差 $\Delta\omega_s$ 。风电场由 20 台 2.5 MW 的 DFIG 组成。假设风电场内各台风机工作状态相同，故可以将风电场视为一台等值机组^[18]，其参数如下：额定电压为 690 V，频率为 50 Hz，额定容量为 50 MW，额定风速为 12 m/s，定子电抗为 3.07 p.u.，励磁电抗为 2.9 p.u.，转子电抗为 3.056 p.u.，转子最大允许电流为 1 p.u.，网侧变流器容量为 0.5 p.u.。区域 1 向区域 2 传输的功率为 205 MW。

3.1 DFIG 采用虚拟惯量控制对小干扰稳定性的影响

通过对 DFIG 出口母线电压锁相，得到电压频率反馈信号。在最大功率点跟踪模式下的 DFIG 中附加传统比例-微分(PD)虚拟惯量控制，比较采用和不采用虚拟惯量控制下系统的振荡情况。区域联络线中的一回线在 2 s 时发生三相短路，0.1 s 后故障消失，联络线 7-8 有功功率的变化情况如图 7 所示。

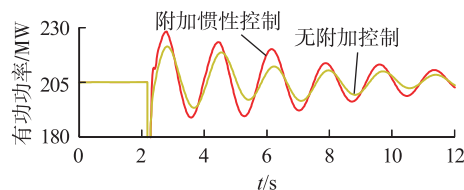


图7 采用和不采用惯性控制的动态响应对比

Fig.7 Comparison of dynamic response between with and without inertial control

由图 7 可知，系统发生故障后，当 DFIG 采用虚拟惯性控制时，降低了系统区域振荡模式的阻尼，不利于区域间功率振荡的抑制。

3.2 恒定风速下 STATCOM 附加阻尼控制效果

当 DFIG 采用虚拟惯量控制，风电场运行在 10 m/s 的风速下时，联络线 7-8 中的一回线在 2 s 发生持续时间为 0.1 s 的三相短路故障。在 STATCOM 有无附加 ADRC 情况下，联络线 7-8 有功功率、母线 2 所连发电机输出的有功功率、母线 6 上的电压(标幺值)和风电场输出的无功功率(标幺值)见图 8。图中，STATCOM 表示 STATCOM 无附加自抗扰控制器；ADRC-STATCOM 表示 STATCOM 加装了自抗扰控制器。

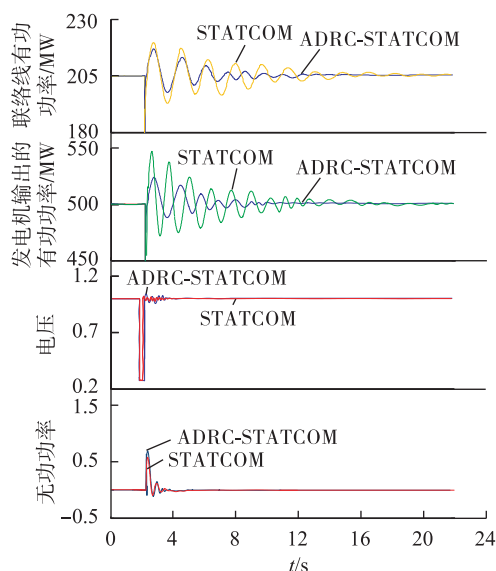


图8 仿真波形

Fig.8 Simulative waveforms

从图 8 可知，短路故障会引起系统的功率振荡，当 STATCOM 附加 ADRC 后，通过动态无功调节，改善了系统的阻尼特性，减小了功率振荡时间；附加自抗扰阻尼控制器的 STATCOM 在利用无功调节改善系统阻尼特性时，不会引起电网电压的剧烈波动；控制器在为系统提供阻尼支持时，基本不会对风电场的无功造成负面影响。

3.3 变风速下 STATCOM 附加阻尼控制效果

当风机运行于如图 9 所示的风速变化范围为 5~13 m/s 变风速下，控制器参数不变，故障同 3.2 节时，联络线有功功率见图 10。图 11 给出了风速为 8 m/s 时，同样故障情况下的联络线有功功率。

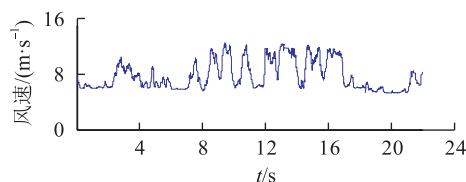


图9 风速变化

Fig.9 Wind speed variation

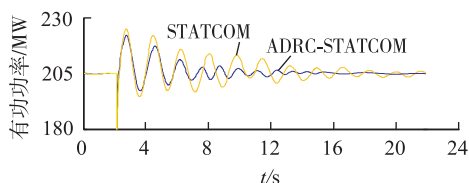


图10 变风速下有无附加控制时联络线有功功率

Fig.10 Active powers of tie line with and without additional control under variable wind speed

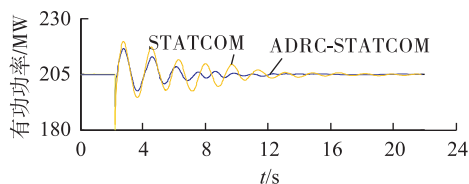


图11 8 m/s 风速下有无附加控制联络线有功功率

Fig.11 Active powers of tie line with and without additional control under 8 m/s wind speed

由图10和图11可知,在变风速下,STATCOM附加自抗扰控制器增强了系统阻尼,有效地抑制了功率振荡,且联络线功率能够较快地恢复稳定。

3.4 PID控制和ADRC对比

设置线路7-8在2s时发生持续时间为0.1s的三相短路故障,图12为采用PID控制器和自抗扰控制器情况下的联络线有功功率。

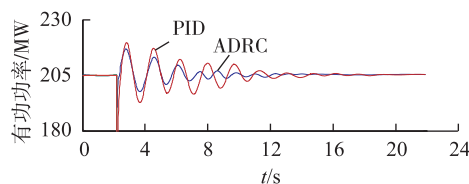


图12 不同控制效果对比

Fig.12 Comparison of different control effects

由图12可以看出,2种控制器均能对系统功率振荡起抑制作用,但采用基于ADRC设计的附加阻尼控制器时,系统在10s左右就可以到达稳态,而采用PID附加阻尼控制器时,系统在15s时才逐渐稳定,可见本文设计的自抗扰控制器优于PID控制器,可以更加快速地抑制系统的低频振荡。

4 结论

本文研究了风电机组在虚拟惯量控制下对电力系统小扰动稳定的影响,提出了通过利用配置在风电场中的STATCOM设计附加自抗扰阻尼控制器来增强系统动态稳定的方法。得出如下结论:

a. 含虚拟惯量控制的风电场会影响系统阻尼,使系统机电模式的特征根向右移动,阻尼减小;

b. STATCOM附加自抗扰阻尼控制器增强了互联系系统阻尼,从而提升系统稳定性,且不会显著影响系统的电压稳定性;

c. 相比于传统的PID附加阻尼控制器,基于ADRC设计的STATCOM附加阻尼控制器可以更好地改善系统阻尼,抑制功率振荡。

参考文献:

- [1] 倪以信,陈寿孙,张宝霖,等. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:260-291.
- [2] 秦超,曾沅,苏寅生,等. 基于安全域的大规模风电并网系统低频振荡稳定分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(5):100-106. QINChao,ZENG Yuan,SU Yinsheng,et al. Low-frequency oscillatory stability analysis based on security region for power system with large-scale wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(5):100-106.
- [3] 王忱,石立宝,姚良忠,等. 大规模双馈型风电场的小扰动稳定分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(4):63-70. WANG Chen,SHI Libao,YAO Liangzhong,et al. Small signal stability analysis of the large-scale wind farm with DFIGs[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(4):63-70.
- [4] 蒋长江,刘俊勇,刘友波,等. 计及风电随机激励的电力系统暂态稳定分析[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):100-108. JIANG Changjiang,LIU Junyong,LIU Youbo,et al. Transient stability analysis of power system considering wind-power stochastic excitation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,36(3):100-108.
- [5] 张红光,张粒子,陈树勇,等. 大容量风电场接入电网的暂态稳定特性和调度对策研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(31):45-51. ZHANG Hongguang,ZHANG Lizi,CHEN Shuyong,et al. Studies on the transient behavior and dispatching strategy of power system integrated with large scale wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2007,27(31):45-51.
- [6] XI Xinze,GENG Hua,YANG Geng. Small signal stability of weak power system integrated with inertia tuned large scale wind farm[C]//Proceedings of IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia. Kuala Lumpur,Malaysia:IEEE,2014:514-518.
- [7] 严伟佳,蒋平. 抑制区域间低频振荡的FACTS阻尼控制[J]. 高电压技术,2007,33(1):189-192. YAN Weijia,JIANG Ping. Damping control with FACTS aiming at damping inter-area oscillation[J]. High Voltage Technology,2007,33(1):189-192.
- [8] 刘隽,李兴源,汤广福,等. SVC电压控制与阻尼调节间的相互作用机理[J]. 中国电机工程学报,2008,28(1):12-17. LIU Jun,LI Xingyuan,TANG Guangfu,et al. Interrelations between SVC voltage control and damping control[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(1):12-17.
- [9] 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,2013:20-27.
- [10] SONG Rui,LI Yibin. Study on ADRC-based mobile robot lateral control[C]//IEEE International Conference on Robotics and Bio-

- mimetics. Sanya, China: IEEE, 2007: 1190-1193.
- [11] 刘星桥,唐琳,朱丽婷. 模糊自抗扰控制的三电机同步协调系统[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(4): 104-109.
- LIUXingqiao, TANG Lin, ZHU Liting. Three-motor synchronous control system based on fuzzyactive disturbances rejection control[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(4): 104-109.
- [12] 陈润泽,吴文传,孙宏斌,等. 双馈风电机组惯量控制对系统小干扰稳定的影响[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 6-12.
- CHEN Runze, WU Wenchuan, SUN Hongbin, et al. Impact of inertia control of DFIG wind turbines on system small-signal stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 6-12.
- [13] 张祥宇,付媛,王毅,等. 含虚拟惯性与阻尼控制的变速风电机组综合 PSS 控制器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 159-169.
- ZHANG Xiangyu, FU Yuan, WANG Yi, et al. Integrated PSS controller of variable speed wind turbines with virtual inertia and damping control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 159-169.
- [14] 蒋平,叶慧,吴熙. 基于留数的静止同步补偿器附加阻尼鲁棒控制[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 131-135.
- JIANG Ping, YE Hui, WU Xi. Residue-based robust control method for additional damping controller of static synchronous compensator[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 131-135.
- [15] 和萍,文福拴, Ledwich Gerard, 等. 附加阻尼控制静止无功补偿器对含风电互联系统阻尼特性的影响[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2014, 23(2): 6-14.
- HE Ping, WEN Fushuan, Ledwich Gerard, et al. Impacts of ADC-SVC on damping characteristics of interconnected power systems with wind farms[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2014, 23(2): 6-14.
- [16] 杨福. STATCOM 在风电场无功补偿中的应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- YANG Fu. Application of STATCOM in wind farm reactive power compensation[D]. Ji'nan: Shandong University, 2012.
- [17] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA: McGraw-Hill Inc, 1994: 35-48.
- [18] 苏勋文,米增强,王毅. 风电场常用等值方法的适用性及其改进研究[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 175-180.
- SU Xunwen, MI Zengqiang, WANG Yi. Applicability and improvement of common-used equivalent methods for wind farms[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 175-180.

作者简介:



马燕峰

马燕峰(1978—),女,河北迁西人,副教授,博士,研究方向为电力系统分析、运行与控制(E-mail: ma_yanfeng01@163.com);

刘会强(1990—),男,内蒙古鄂尔多斯人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析(E-mail: LLHHQQ0605@163.com);

俞人楠(1992—),女,安徽铜陵人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析(E-mail: 472817688@qq.com)。

Power oscillation suppression based on STATCOM in wind farm

MA Yanfeng, LIU Huiqiang, YU Rennan

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Wind farms with virtual inertia control brings some new influences to the small disturbance stability. Under this background, the suppression of the low-frequency oscillation in power system by the additional damping control of STATCOM (STATIC synchronous COMPensator) in wind farms is proposed. The influences of the virtual inertia control on damping characteristics of the wind power grid-connected system are analyzed by the damping torque method. Then, the control strategy to enhance the dynamic stability of the system with STATCOM in wind farms is proposed. Based on the theory of auto disturbance rejection, an additional damping controller of STATCOM is designed to improve damping characteristics. A typical 4-machine 2-area system is built on the DlgSILENT platform, and simulative results show that the STATCOM with additional auto disturbance rejection damping control can effectively suppress the power oscillation.

Key words: wind farms; virtual inertia; STATCOM; auto disturbance rejection control; low-frequency oscillation