

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.02.026

提升双馈风力发电系统低电压穿越能力的跟踪控制方法

王若谷¹, 张若微², 王明杰², 高欣¹, 秦博宇²

(1. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100;

2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:为提升双馈风力发电系统的低电压穿越(LVRT)能力,提出一种基于状态相关 Riccati 方程(SDRE)技术的网侧换流器(GSC)跟踪控制方法。并网导则要求风电场在LVRT过程中须注入一定无功功率支撑电压恢复,为了改进非线性状态调节器在无功支撑能力上的不足,针对双馈风力发电系统的GSC设计非线性无功功率跟踪控制器,并采用SDRE技术求解状态反馈控制律。在维持LVRT过程中直流电压稳定的基础上,该方法能充分利用GSC的无功功率调节能力,为电网提供无功功率支撑以避免电压恶化。最后,在Matlab/Simulink平台搭建9 MW双馈风力发电系统,并在三相接地故障下进行仿真验证,结果显示,所提出的GSC控制方法具有良好的暂态表现,能够有效提高双馈风力发电系统的LVRT能力。

关键词:双馈风力发电系统;低电压穿越(LVRT);网侧换流器(GSC);无功功率支撑;跟踪控制

中图分类号:TM614

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)02-0185-07

0 引言

伴随能源危机和环境问题在全球范围内的逐渐加重,以风能为代表的可再生能源在我国取得了长足发展。据最新公布的全国电力工业统计数据显示,2019年我国累计并网风电设备容量已经达到2.1亿千瓦,同比增长14%^[1]。然而,大规模风电并网给电网安全稳定运行带来极大挑战,其中最为突出的是因风电场低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)能力不足导致的连锁脱网事故^[2-4]。双馈风机(doubly-fed induction generator, DFIG)作为风力发电的主流机型之一,提升其LVRT能力对提高风电并网稳定性具有重大意义。

现有LVRT方案主要可以分为三类:加装硬件设备、换流器控制以及二者的协调配合。硬件设备主要包括:加装撬棒电路^[5-6]、转子串电阻^[7-9]、直流卸荷电路^[10]及无功功率补偿装置^[11]等。换流器控制主要包括转子侧换流器(rotor side converter, RSC)和网侧换流器(grid side converter, GSC)控制。文献[12]针对传统矢量控制的不足,改进了相应的换流器控制方案。文献[13]在PI控制的基础上,针对定子磁链出现的负序和直流分量制定了相应控制策略。然而,这类基于线性模型的控制器在严重故障扰动下无法保证良好的动态性能。文献

[14]将微分几何理论应用于RSC的控制,提出一种基于精确线性化的非线性控制器,但其控制律的实现均较为复杂,不利于实际工程应用。文献[15]提出一种GSC低电压穿越控制策略,通过改变调制电压信号以达到抑制直流母线电压的目的,然而未对严重故障下直流母线电压的控制效果进行讨论。文献[16]设计了一种基于李雅普诺夫稳定判据的GSC非线性控制器,尽管能一定程度抑制直流母线电压波动,但可能无法保证双馈风机暂态期间的无功支撑能力。状态相关 Riccati 方程(state dependent Riccati equation, SDRE)理论^[17]为设计非线性暂态控制器提供了新的思路,文献[18]基于SDRE理论设计了一种RSC的非线性状态调节器,能在暂态期间调节状态变量至原平衡点附近,但受限于状态调节器的设计原理,无法主动调节暂态期间无功功率。

利用SDRE理论设计的非线性系统暂态控制器具有更强的灵活性和更大的稳定范围,并且实现方式更为简单。因此,文中提出一种基于SDRE理论的GSC跟踪控制方法,以进一步提升DFIG的LVRT能力。首先,以抑制外界干扰影响、维持故障期间直流母线电压稳定以及提供无功功率支撑为控制目标,建立GSC的控制问题。然后,利用SDRE理论完成上述问题的求解,获得状态反馈控制律。最后,将上述GSC控制配合DC chopper保护电路构成完整的综合LVRT策略。

1 控制问题描述

GSC的结构如图1所示,可采用式(1)中的三

收稿日期:2020-09-14;修回日期:2020-10-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51707147);陕西省重点研发计划重点产业创新链资助项目(2017ZDCXL-GY-02-03)

阶动态模型进行分析。

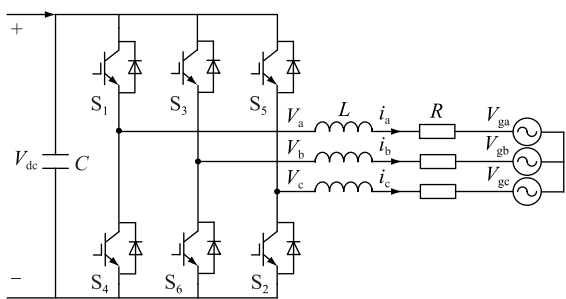


图1 双馈风机 GSC 的结构

Fig.1 Structure of GSC in doubly-fed induction generator

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = v_d - v_{gd} - Ri_d + \omega_s Li_q \\ L \frac{di_q}{dt} = v_q - v_{gq} - Ri_q - \omega_s Li_d \\ \frac{1}{2}C \frac{dV_{dc}^2}{dt} = P_r - P_g - \frac{V_{dc}^2}{R_{loss}} \end{cases} \quad (1)$$

式中： v_d, v_q 分别为 GSC 交流侧电压的 d, q 分量； i_d, i_q 分别为 GSC 输入电流的 d, q 分量； V_{dc} 为直流母线电压； R, L 分别为滤波器及进线电抗器的电阻和电抗之和； ω_s 为同步角速度； v_{gd}, v_{gq} 分别为并网电压的 d, q 分量； C 为直流母线电容器； P_g 为 GSC 输出的有功功率； P_r 为 RSC 输出的有功功率； R_{loss} 为 GSC 的等效电阻。

将三阶模型式(1)转换为一般仿射非线性形式,并将平衡点移动至原点,如式(2)所示。

$$\dot{x} = f(x) + g_1(x)d + g_2(x)u \quad (2)$$

式中： x 为受控系统的状态变量； $f(x)$ 为状态变量的函数； u 为受控系统的控制变量； d 为外界干扰； $g_1(x), g_2(x)$ 分别为干扰和控制变量的系数矩阵。

$$x = [\Delta i_d \quad \Delta i_q \quad \Delta V_{dc}^2]^T \quad (3)$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}\Delta i_d + \omega_s \Delta i_q \\ -\omega_s \Delta i_d - \frac{R}{L}\Delta i_q \\ -\frac{2v_{dc}}{C}\Delta i_d - \frac{2v_{qc}}{C}\Delta i_q - \frac{2}{CR_{loss}}\Delta V_{dc}^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$u = [\Delta v_d \quad \Delta v_q]^T \quad (5)$$

$$d = [\Delta v_{gd} \quad \Delta v_{gq} \quad \Delta P_r]^T \quad (6)$$

$$g_1(x) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2}{C} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$g_2(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ -2\frac{i_{dc} + \Delta i_d}{C} & -2\frac{i_{qc} + \Delta i_q}{C} \end{bmatrix} \quad (8)$$

从式(1)可以看出, GSC 的状态变量存在相互耦合关系,并且呈现非线性的特征。

传统 GSC 的线性控制器通过引入电网电压扰动项和电流状态反馈进行前馈补偿,以达到解耦控制的目的。这种控制方法需要在平衡点处对状态方程线性化,因此在系统偏离平衡点较远时控制器不能完全反映系统的动态,难以保证其暂态控制有效。因此,为了降低外界干扰的影响,有必要设计一种考虑干扰抑制的非线性控制器。

非线性干扰抑制控制主要解决 2 个问题:第一,寻找一种控制策略,使在 $d=0$ 时, GSC 系统在 $x=0$ 处渐近稳定;第二,当初始条件为 $x(0)=0$ 时,这种控制策略使系统从干扰 d 到调节输出向量 z 的增益小于或等于给定的正数 γ ^[19],即:

$$\int_0^T (\|d^2\|/\|z\|^2) dt \leq \gamma^2 \quad (9)$$

为了通过状态反馈控制律 u 将干扰 d 对输出的不利影响减少到一个足够小的程度,建立如下极大-极小微分对策问题。

$$\begin{cases} \max_d \min_u \int_0^\infty (\|z(x,u)\|^2 - \gamma^2 \|d\|^2) dt \\ \text{s.t. } \dot{x} = f(x) + g_1(x)d + g_2(x)u \\ z(x,u) = H(x) + K(x)u \end{cases} \quad (10)$$

式中： $z(x,u)$ 为调节输出,可根据实际控制目标选取； γ 为抑制干扰的指标, γ 越小代表干扰对输出带来的不利影响越小。上述问题的含义为:受控系统受到控制变量 u 和干扰变量 d 两类作用影响,形成一个对策问题,并且该对策必须满足如式(10)中的微分方程。

DFIG 机端发生电压暂降时,将求解干扰抑制控制问题得到的状态反馈控制律 u 作为 GSC 的输出电压信号,此时 GSC 满足性能指标对控制变量极小和对干扰量极大,这意味着该控制律即为在最坏可能干扰 d 下的系统最佳控制策略。

GB/T 19963—2011^[20]要求:当风电场并网电压跌落至0.2 p.u.时,风电机组应通过注入无功电流支撑电压恢复。而 DFIG 稳态运行时, GSC 一般保持功率因数为 1,存在一定的无功功率调节能力。为了进一步提高 DFIG 暂态期间的 LVRT 能力, GSC 的暂态控制目标应为保证直流母线电压稳定和提供

无功功率支撑,因此设计相应的跟踪控制器^[21]实现上述目标。

输出跟踪控制器一般选取期望输出与实际输出的偏差作为调节量。结合控制目标,选择 GSC 无功功率以及直流母线电压作为关注的输出量。其中,GSC 输出的无功功率可以表示为:

$$\Delta Q_{\text{GSC}} = [u_q \quad -u_d \quad 0] \mathbf{x} = \mathbf{C}_1 \mathbf{x} \quad (11)$$

而直流母线电压可以表示为:

$$\Delta V_{\text{dc}}^2 = [0 \quad 0 \quad 1] \mathbf{x} = \mathbf{C}_2 \mathbf{x} \quad (12)$$

因此,文中选择调节输出 $\mathbf{z}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 为:

$$\begin{cases} \mathbf{z}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \mathbf{D}(\mathbf{x}) \mathbf{u} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ 0 \end{bmatrix} \\ z_1 = \mathbf{C}_1 \mathbf{x} \\ z_2 = \mathbf{C}_2 \mathbf{x} \end{cases} \quad (13)$$

式中: z_1 为无功功率输出; z_2 为直流母线电压的平方; y_1 为期望无功功率变化量,可根据 GSC 的容量约束进行调整; y_2 为 0 表示希望暂态期间直流母线电压在平衡点处保持稳定; $\mathbf{D}(\mathbf{x})$ 为控制变量 \mathbf{u} 的权重矩阵,暂态期间可以选择 $\mathbf{D}(\mathbf{x})$ 作为期望与实际输出的偏差 e_z 的衰减函数,从而达到平衡控制成本和控制效果的目的。

$$\mathbf{D}(e_z) = \text{diag} \left(\frac{m}{\sqrt{n + e_z^2}}, \frac{m}{\sqrt{n + e_z^2}} \right) \quad (14)$$

式中: m, n 为可根据控制成本的考虑自由选择常数。当偏差 e_z 越大时,为了提升控制效果,需要此时控制输出越大越好,即选择权重矩阵越小。相反,当偏差 e_z 趋于 0 时,意味着输出趋于期望值,此时可以适当降低控制输出,节约控制成本,即选择权重矩阵越大。

通过对式(10)极大极小微分对策问题的求解,可以获得状态反馈控制律 \mathbf{u} ,实现维持故障期间直流母线电压稳定以及提供无功功率支撑的控制目标。然而,对于一个非线性系统而言,直接求解上述微分对策问题是非常困难的,为了解决这一问题,文中采用 SDRE 理论来进行近似求解。

2 干扰抑制控制律的求解

第 1 章已经构建了如式(10)所示的待求解的控制问题,在微分方程式(2)的约束下,求解状态反馈控制律 \mathbf{u} 的优化控制问题本质上可以看作是带有约束条件的变分问题。这类问题通过极值原理最终可以转化为求解 Hamilton-Jacobi-Issacs 偏微分不等式^[19]。求解过程如下:

(1) 建立增广泛函 \bar{J} 。

$$\bar{J} = \int_0^T (\|\mathbf{z}\|^2 - \gamma^2 \|\mathbf{d}\|^2 + \boldsymbol{\Lambda}^T [\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_1(\mathbf{x}) \mathbf{d} + \mathbf{g}_2(\mathbf{x}) \mathbf{u} - \dot{\mathbf{x}}]) dt \quad (15)$$

其中 $\boldsymbol{\Lambda} \in \mathbf{R}^n$ 为 Lagrange 乘子向量。

(2) 构造系统的 Hamilton(\mathbf{H}) 函数。

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\Lambda}, \mathbf{d}, \mathbf{u}) &= \|\mathbf{z}\|^2 - \gamma^2 \|\mathbf{d}\|^2 + \\ &\boldsymbol{\Lambda}^T(t) [\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_1(\mathbf{x}) \mathbf{d} + \mathbf{g}_2(\mathbf{x}) \mathbf{u}] \end{aligned} \quad (16)$$

将 $\mathbf{z}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ 代入(15)中,得到:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\Lambda}, \mathbf{d}, \mathbf{u}) &= \boldsymbol{\Lambda}^T(t) [\mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_1(\mathbf{x}) \mathbf{d} + \\ &\mathbf{g}_2(\mathbf{x}) \mathbf{u}] + \|\mathbf{H}(\mathbf{x}) + \mathbf{K}(\mathbf{x}) \mathbf{u}\|^2 - \gamma^2 \|\mathbf{d}\|^2 \end{aligned} \quad (17)$$

(3) 求解泛函 \bar{J} 的极值曲线 \mathbf{d}^* 和 \mathbf{u}^* 。利用极值原理求解,最终得到 \bar{J} 的极值曲线 \mathbf{d}^* 和 \mathbf{u}^* :

$$\mathbf{d}^*(\mathbf{x}, \mathbf{V}_x^T) = \boldsymbol{\alpha}_1(\mathbf{x}) = \frac{1}{2\gamma^2} \mathbf{g}_1^T(\mathbf{x}) \mathbf{V}_x^T \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^*(\mathbf{x}, \mathbf{V}_x^T) &= \boldsymbol{\alpha}_2(\mathbf{x}) = \\ &-\mathbf{r}^{-1}(\mathbf{x}) \left[\frac{1}{2} \mathbf{g}_2^T(\mathbf{x}) \mathbf{V}_x^T + \mathbf{K}^T(\mathbf{x}) \mathbf{H}(\mathbf{x}) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

式中: \mathbf{V}_x 为一个非负函数 $V(\mathbf{x})$ 的梯度向量,且 $\mathbf{V}(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$; $\mathbf{r}(\mathbf{x}) = \mathbf{K}^T \mathbf{K}$, 为非奇异矩阵。 \mathbf{V}_x 为哈密顿-雅可比-伊萨克斯 (Hamilton-Jacobi-Issacs, HJI) 不等式,即式(20)的解。

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_x \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{H}^T(\mathbf{x}) \mathbf{H}(\mathbf{x}) + \gamma^2 \boldsymbol{\alpha}_1^T(\mathbf{x}) \boldsymbol{\alpha}_1(\mathbf{x}) - \\ \boldsymbol{\alpha}_2^T(\mathbf{x}) \mathbf{r}(\mathbf{x}) \boldsymbol{\alpha}_2(\mathbf{x}) \leq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

所求暂态控制律则可根据式(20)得到,该控制律即为干扰抑制控制律。对于非线性系统, HJI 不等式(20)缺乏解析解的通用求解方法,但是对于线性系统而言,上述问题可以通过 Riccati 不等式方便地求解。SDRE 理论将仿射非线性系统的状态方程在平衡点处拓展线性化,形成含有状态相关 (state dependent coefficient, SDC) 矩阵的类线性结构,从而通过求解状态相关 Riccati 方程获得原系统的状态反馈控制律。

2.1 SDRE 理论简介

SDRE 理论由于其控制灵活、设计简单的特点,已在飞行器设计、无人机控制等领域得到应用^[22]。通过拓展线性化,SDRE 理论能将一般非线性系统的状态方程转化为状态相关的类线性形式。对于含有多状态变量的受控非线性系统,非线性项的分解存在无穷多种,其对应的系统动态响应也存在差异,这为优化 SDRE 控制器提供了额外的自由度^[23]。非线性系统在经过拓展线性化之后可以看作一个随状态变量时刻变化的线性系统。在每个采样时刻, $\mathbf{A}(\mathbf{x})$, $\mathbf{B}_1(\mathbf{x})$, $\mathbf{B}_2(\mathbf{x})$, $\mathbf{C}(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{D}(\mathbf{x})$ 均可看作根据当前状态变量而确定的常数矩阵。

$$\begin{cases} \dot{x} = A(x)x + B_1(x)d + B_2(x)u \\ z = C(x)x + D(x)u \end{cases} \quad (21)$$

其中,

$$\begin{cases} A(x)x = f(x) \\ C(x)x = H(x) \\ D(x) = K(x) \\ B_1(x) = g_1(x) \\ B_2(x) = g_2(x) \end{cases} \quad (22)$$

用上述状态相关矩阵代替不等式(20)中的 $f(x), g_1(x), g_2(x), H(x), K(x)$, 可以看到此时 HJI 不等式转变为式(23)所示的不等式, 该不等式也被称作状态相关 Riccati 不等式。

$$A^T(x)\hat{P} + \hat{P}A(x) + \hat{P}[\gamma^{-2}B_1(x)B_1^T(x)]\hat{P} - \hat{P}[B_2(x)B_2^T(x)]\hat{P} + C^T(x)C(x) \leq 0 \quad (23)$$

式中: \hat{P} 为待求 Riccati 不等式的解。

2.2 GSC 控制器设计

GSC 的状态方程(2)经过上述变换后可以表述为式(21)所示的形式。其中, $A(x)$ 表达式为:

$$A(x) = A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & w_s & 0 \\ -w_s & -\frac{R}{L} & 0 \\ -\frac{2v_{de}}{C} & -\frac{2v_{qe}}{C} & -\frac{2}{CR_{loss}} \end{bmatrix} \quad (24)$$

根据 SDRE 理论, 在每个采样时刻都可以对状态相关 Riccati 不等式(23)进行求解, 由式(13)、式(19)和式(23)可以推导出 GSC 的状态反馈跟踪控制律^[17], 可表述为:

$$u = -r^{-1}B_2^T(x)\hat{P}x + r^{-1}B_2^T(x)\hat{g} \quad (25)$$

其中, \hat{g} 为微分方程(26)的解。期望输出 y 反映在(25)中等式右侧的 $r^{-1}B_2^T(x)\hat{g}$ 中, 如式(26)所示。

$$\dot{\hat{g}} = [\hat{P}B_2(x)r^{-1}B_2^T(x) - A^T(x)]\hat{g} - C^T(x)y \quad (26)$$

在实际应用中, 实现 SDRE 技术的主要计算量在于每个采样时刻对代数 Riccati 不等式的求解。需要说明的是, 随着嵌入式处理器的快速发展, 已有大量采用 SDRE 技术进行实时控制的实际案例^[24-26], 实时求解的计算量已经不再是影响 SDRE 实际应用的问题。

3 综合 LVRT 策略

GSC 跟踪控制和 DC chopper 保护电路的协调

配合共同构成了 DFIG 综合 LVRT 策略, 具体流程如图 2 所示。

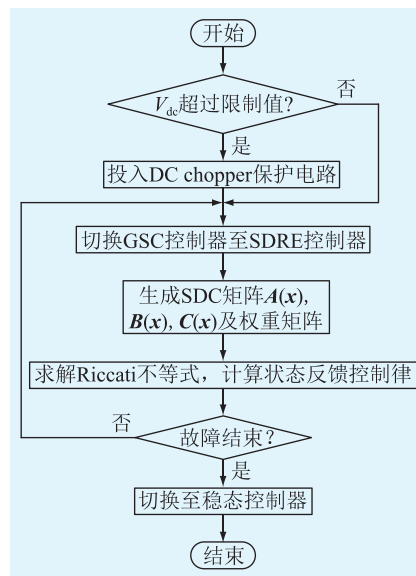


图 2 综合 LVRT 策略流程

Fig.2 Flow chart of comprehensive LVRT strategy

在故障初期, 并网电压突然降低, 由于定子磁链不能突变, 产生的定子磁链直流分量在转子侧感应出暂态电动势并导致转子电流骤增, 最终造成直流母线过电压。此阶段的直流母线电压很难直接用 GSC 控制完全抑制, 因此, 投入 DC chopper 保护电路来降低转子过电流从而抑制直流母线过电压。与此同时, 切换 GSC 的稳态控制至暂态 SDRE 控制。根据 3.2 节中的方法, 在每个采样时刻生成 SDC 矩阵以及权重矩阵, 求解对应的 Riccati 不等式, 由式(25)和式(26)计算状态反馈控制律并将调制后的信号送至 RSC 直至暂态过程结束。最后, 当并网点的电压恢复至故障前附近水平时认为故障结束, 此时切换为原稳态控制, 至此完成双馈风机 LVRT 全过程。

4 算例分析

在 Matlab/Simulink 仿真平台中的单机无穷大 (single machine infinite bus, SMIB) 系统中进行仿真测试, 验证所设计的综合 LVRT 策略在系统遭遇故障时的有效性。SMIB 系统的结构如图 3 所示。

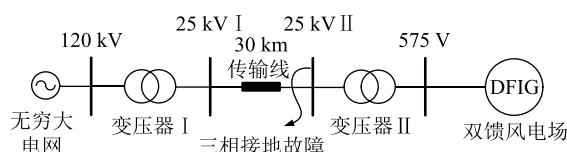


图 3 SMIB 系统结构

Fig.3 Structure of the SMIB system

双馈风电场(包含6台1.5 MW DFIG)的详细参数见 Matlab/Simulink R2019b 中的 detail 模型。风速设置为 15 m/s。t=2 s 时,在 25 kV II 处设置三相接地短路故障,接地电阻为 2 Ω ,故障持续时间为 625 ms。故障期间 GSC 分别采用 PI 控制、精确线性化控制^[10]与 SDRE 控制,仿真结果见图 4—图 6。

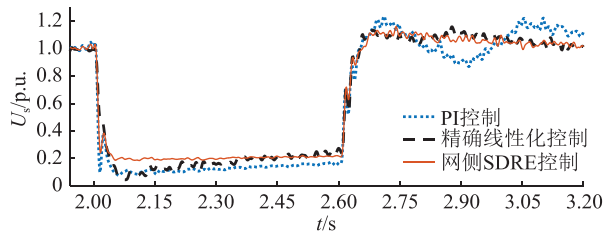


图4 并网电压

Fig.4 Voltage of point of common coupling

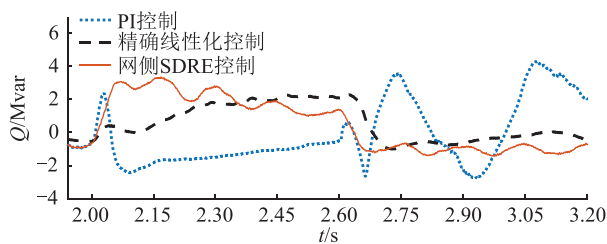


图5 DFIG 输出无功功率

Fig.5 Reactive power output of DFIG

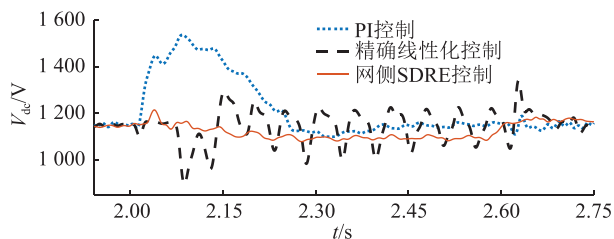


图6 直流母线电压

Fig.6 DC link voltage

从图 4 可以看出,在发生三相短路故障后,采用 PI 控制的风电场其并网电压已经跌至 0.16 p.u. 附近,采用精确线性化控制的风电场其并网电压在暂态期间逐步抬升,而采用网侧 SDRE 控制的风电场其并网电压在故障初始即可抬升至约 0.2 p.u.。其原因在图 5 中体现:故障发生瞬间,采用 PI 控制的风电场只在初期短暂提供了一定无功功率,然后无功输出迅速下滑并全程处于吸收无功的情形,无法满足双馈风力发电系统 LVRT 的要求;而采用网侧 SDRE 控制的风电场在故障发生后能持续保持较高无功功率输出,从而支撑故障期间的电网电压。同时,故障结束后,采用 PI 控制的风电场无功出现较为明显的波动,而采用精确线性化控制、网侧 SDRE 控制的风电场无功过渡更为平滑。如图 6 所示,严

重故障下采用 PI 控制的风电场其直流母线电压发生骤增,峰值甚至达到 1 500 V,采用精确线性化控制的风电场虽然能够一定程度上抑制直流母线电压骤增,但是直流电压并不平稳,出现振荡现象。而采用网侧 SDRE 控制的风电场则有效抑制了直流母线电压的波动。另一方面,采用 PI 控制的风电场其直流电压的调节时间过长,约 0.27 s 后才稳定在平衡点附近,这可能会导致直流电容过充损坏,甚至威胁换流器的正常工作。综上所述,文中所设计的综合 LVRT 策略能够满足故障期间双馈风电场对 LVRT 的要求。

5 结语

文中提出了一种基于状态相关 Riccati 方程技术的 GSC 跟踪控制方法,并设计了 DFIG 的综合 LVRT 策略。为实现 DFIG 在电网电压跌落的情况下连续运行不脱网并提供一定的无功支撑,建立了 GSC 干扰抑制控制问题。根据相应的控制目标设计了 GSC 跟踪控制器,并应用 SDRE 理论获得状态反馈控制律。为进一步抑制电网电压下降初期的直流过电压,采用 DC chopper 保护电路协调配合网侧 SDRE 控制降低转子暂态过电流的影响。在 SMIB 系统中进行仿真测试,结果表明,文中所设计的综合 LVRT 策略能够在严重电网故障下较好地维持直流母线电压的稳定,并且能充分利用 GSC 的无功调节能力为电网提供一定的无功功率支撑。

本文得到国网陕西省电力公司科技项目(B62-6KY190005)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 国家能源局. 2019 年全国电力工业统计数据[EB/OL]. [2020-07-09]. http://www.nea.gov.cn/2020-01/20/c_13872-0881.htm.
National Energy Administration. National electric power industry statistics in 2019[EB/OL]. [2020-07-09]. http://www.nea.gov.cn/2020-01/20/c_138720881.htm.
- [2] 年珩,程鹏,贺益康. 故障电网下双馈风电系统运行技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2015,35(16):4184-4197.
NIAN Heng, CHENG Peng, HE Yikang. Review on operation techniques for DFIG-based wind energy conversion systems under network faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4184-4197.
- [3] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报,2010,30(25):1-9.
ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [4] 宋文峰,王倩,李亚楠,等. 基于双馈风电场低电压穿越的高

- 温超导故障限流器建模及其参数优化[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 99-107.
- SONG Wenfeng, WANG Qian, LI Yanan, et al. Modeling and parameter optimization of HTS-FCL based on low voltage ride-through of doubly-fed wind farm [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 99-107.
- [5] XIED L, XU Z, YANG L H, et al. A comprehensive LVRT control strategy for DFIG wind turbines with enhanced reactive power support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3302-3310.
- [6] 周步祥, 董申, 林楠, 等. 计及撬棒电路的双馈风电机组二次骤升故障穿越特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 152-159.
- ZHOU Buxiang, DONG Shen, LIN Nan, et al. Analysis of double-fed wind turbine's secondary high voltage ride-through characteristics considering the crowbar circuit [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 152-159.
- [7] 唐冰婕, 迟永宁, 田新首, 等. 基于阻抗频域灵敏度的双馈风电机组次同步振荡抑制措施[J]. 供用电, 2019, 36(10): 73-79.
- TANG Bingjie, CHI Yongning, TIAN Xinshou, et al. Sub-synchronous oscillation mitigation schemes of DFIG wind turbine based on impedance frequency-domain sensitivity[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(10): 73-79.
- [8] 吴雨, 薛安成, 付潇宇, 等. 高频扰动下的双馈风机系统频率响应及其振荡风险分析[J]. 浙江电力, 2018, 37(11): 29-35.
- WU Yu, XUE Ancheng, FU Xiaoyu, et al. Frequency Response Analysis of DFIG system and the oscillation risk under high-frequency disturbance [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(11): 29-35.
- [9] 凌禹, 蔡旭. 基于转子串电阻的双馈风电机组故障穿越技术[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 25-30.
- LING Yu, CAI Xu. Fault ride-through of DFIG wind turbine with rotor series resistor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 25-30.
- [10] PANNELL G, ZAHAWI B, ATKINSON D J, et al. Evaluation of the performance of a DC-link brake chopper as a DFIG low-voltage fault-ride-through device [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(3): 535-542.
- [11] 韩强, 蒋燕玲, 马进. 基于 STATCOM 的双馈风电场无功电压控制的研究[J]. 陕西电力, 2012, 40(11): 20-25, 37.
- HAN Qiang, JIANG Yanling, MA Jin. Research on reactive power and voltage control in wind farm based on STATCOM and DFIG [J]. Shaanxi Electric Power, 2012, 40(11): 20-25, 37.
- [12] 胡家兵, 孙丹, 贺益康, 等. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 21-26.
- HU Jiabing, SUN Dan, HE Yikang, et al. Modeling and control of DFIG wind energy generation system under grid voltage dip [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 21-26.
- [13] XIANG D W, RAN L, TAVNER P J, et al. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 652-662.
- [14] WU F, ZHANG X P, JU P, et al. Decentralized nonlinear control of wind turbine with doubly fed induction generator [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 613-621.
- [15] 蔚兰, 陈国呈, 曹大鹏, 等. 双馈感应风力发电机网侧变换器低电压穿越控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 37-43.
- YU Lan, CHEN Guocheng, CAO Dapeng, et al. Low voltage ride through control strategy of grid side converter for double-fed induction generators [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 37-43.
- [16] 马晓阳, 杨洪耕, 徐方维, 等. 基于舒茨-基布逊法的双馈风机直流侧电压抑制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 177-183.
- MA Xiaoyang, YANG Honggeng, XU Fangwei, et al. Shultz-Gibson method based DC-link voltage suppression of DFIG-based wind turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 177-183.
- [17] CIMEN T. Survey of state-dependent riccati equation in nonlinear optimal feedback control synthesis[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012, 35(4): 1025-1047.
- [18] 邓三星, 张雪敏, 秦博宇, 等. 基于状态相关 Riccati 方程的双馈风机控制[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1927-1933.
- DENG Sanxing, ZHANG Xuemin, QIN Boyu, et al. Control of doubly fed induction generator based on state dependent riccati equation [J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1927-1933.
- [19] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- LU Qiang, MEI Shengwei, SUN Yuanzhang. Nonlinear control in power system [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [20] 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011 [S]. 2011.
- Standard on connecting wind farms to power system: GB/T 19963—2011 [S]. 2011.
- [21] SAGE A P, WHITE C C, SIOURIS G M. Optimum systems control [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(2): 102-103.
- [22] 张军, 徐世杰. 基于 SDRE 方法的挠性航天器姿态控制[J]. 宇航学报, 2008, 29(1): 138-144.
- ZHANG Jun, XU Shijie. Control of flexible spacecraft via state-dependent riccati equation technique [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(1): 138-144.
- [23] TOPPUTO F, MIANI M, BERNELLI-ZAZZERA F. Optimal selection of the coefficient matrix in state-dependent control methods [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2014, 38(5): 861-873.
- [24] BOGDANOV A, WAN E. State-dependent riccati equation con-

trol for small autonomous helicopters[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2007, 30(1):47-60.

- [25] MENON P K, LAM T, CRAWFORD L S, et al. Real-time computational methods for SDRE nonlinear control of missiles [C]//Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat.No.CH37301). Anchorage, AK, USA. IEEE, 2002; 232-237.
- [26] CIMEN T. Systematic and effective design of nonlinear feedback controllers via the state-dependent Riccati equation (SDRE) method [J]. Annual Reviews in Control, 2010, 34

(1):32-51.

作者简介:



王若谷

王若谷(1984),男,硕士,高级工程师,从事新能源电力系统、储能应用技术等相关工作 (E-mail:75173142@qq.com);

张若微(1995),男,硕士在读,研究方向为新能源控制;

王明杰(1997),男,硕士在读,研究方向为新能源控制。

A tracking control method for doubly-fed induction generator to enhance the low voltage ride through capability

WANG Ruogu¹, ZHANG Ruowei², WANG Mingjie², GAO Xin¹, QIN Boyu²

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Company Research Institute, Xi'an 710100, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to improve the low voltage ride through (LVRT) capability of doubly-fed induction generator (DFIG), a tracking control method for grid side converter (GSC) based on state-dependent Riccati equation (SDRE) technique is proposed. The grid code requires that wind farms should inject reactive power to support voltage recovery during LVRT process. In order to improve the supporting capacity of the nonlinear state-regulator on reactive power, nonlinear reactive power tracking controller is designed in GSC of DFIG, and the state feedback control law is obtained through solving state dependent Riccati equation. On the basis of maintaining the stability of DC link voltage in LVRT process, the reactive power regulation capability of GSC is fully utilized to provide reactive power support for the power grid to avoid voltage deterioration. Finally, a 9 MW DFIG-based wind farm is built by Matlab/Simulink. The simulation results show that the proposed GSC control method has good transient performance and effectively improves the LVRT capability of DFIG through simulation verification under three phase ground faults.

Keywords: doubly-fed induction generator; low voltage ride though (LVRT); grid side converter (GSC); reactive power support; tracking control

(编辑 钱悦)