

DOI: 10.7652/xjtuxb201304011

永磁直驱风力发电系统故障穿越过程瞬态行为分析

王伟, 马西奎

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 采用非线性模态级数法对故障穿越情况下并网永磁直驱风力发电系统的瞬态行为进行分析,使传统的定性分析转入到定量分析。通过建立系统的数学模型,推导出相应的二阶模态级数模型,并进行了数值模拟和理论分析,得出的系统二阶准谐振边界将参数空间分为正常运行区域和二阶谐振区域。研究表明:系统在故障穿越情况下的瞬态过程中存在着丰富的交互模式,特别是存在着很强的二阶交互模式;通过选择合适的参数削弱二阶模态交互作用,可以有效地减小在故障穿越过程中系统振荡的幅值和持续时间。对于系统的二阶准谐振边界,当选择控制参数落入正常状态区域时,能够避免发生二阶谐振,使系统在故障穿越情况下快速实现稳定运行。

关键词: 故障穿越;瞬态行为分析;非线性模态级数;永磁直驱风力发电系统;模态交互

中图分类号: TK89;TM464 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)04-0057-07

Transient Analysis for Fault Ride-Through in Permanent Magnet Synchronous Generator System

WANG Wei, MA Xikui

(State Key Lab of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The transient behavior of fault ride-through process in grid-connected permanent magnet synchronous generator (PMSG) system is evaluated with nonlinear modal series method, so as to transfer the traditionally qualitative project to quantitative one. Theoretical analysis and numerical simulation are conducted by developing the mathematical model and deriving corresponding second order modal series of the PMSG system. Then the second order quasi-resonance boundaries are obtained to divide the parameter space into the normal operation region and second order resonance region. The results show that there are abundant modal interactions, particularly the stronger second order modal interaction, in the system transient fault ride-through process. Selecting the appropriate parameters to weaken second order modal interaction, the amplitude and duration of the system oscillation are reduced effectively during fault ride-through process. For the second order quasi-resonance boundaries, second order resonance can be avoided when the selected control parameters are located in the normal state region, so that the system quickly gets stable.

Keywords: fault ride-through; transient behavior analysis; nonlinear modal series; permanent magnet synchronous generator system; modal interaction

由于永磁直驱风力发电系统具有效率高、可靠性好、体积小、维护费用少等优点^[1],因此成为大型

风力发电设备的首选。随着风力发电机组大规模地接入电网,风力发电系统的故障穿越能力对于电力系统的瞬态稳定性至关重要^[2-3],因此研究故障穿越情况下永磁直驱风力发电系统的瞬态行为也越来越重要。

近年来,已有文献对并网永磁直驱风力发电系统故障穿越的瞬态行为展开了分析,并取得了一些成果^[4-6]。但是,目前的研究工作主要是通过时域仿真,观察仿真波形来判断系统在故障穿越过程中的运行状态,因此缺乏从理论上对整个瞬态过程的理解以及对整个系统行为的分析。

由于非线性模态级数法考虑了系统模型在高阶模态空间中的高阶多项式,并将线性系统的分析理论推广到非线性领域,因此可以用来分析非线性系统^[7-9]。本文采用非线性模态级数法对并网永磁直驱风力发电系统在故障穿越情况下的瞬态行为进行分析,从而使该领域的研究由传统的定性分析转为定量分析。应用该方法,解释了非线性模态交互作用对故障穿越情况下瞬态行为影响的内部物理机制,并进一步对参数与交互模式的关系以及对系统行为的影响进行了分析。最后,通过绘制二阶准谐振边界,揭示了系统控制参数与正常运行状态区域之间的关系。

1 系统描述

1.1 永磁直驱风力发电系统概述

永磁直驱风力发电系统是由风力机、直驱式多极永磁同步发电机、三相背靠背脉冲宽度调制(PWM)变换器、并网滤波器以及控制系统构成,如图1所示。发电机定子通过背靠背变换器和滤波器向电网输电,其中背靠背变换器由电机侧变换器和电网侧变换器组成。中间直流环节由电容构成,实现对两个变换器的解耦,因此两个变换器可以分别独立控制和运行^[10-11]。电机侧变换器用于控制电机转速以实现最大功率追踪,电网侧变换器用于保持中间直流环节电压恒定并控制系统输出功率因数。对于永磁直驱风力发电系统而言,电机侧变换器和电网侧变换器都是通过矢量控制来实现对有功功率和无功功率的解耦。

1.2 系统模型

如前所述,由于永磁直驱风力发电系统是一个非常复杂的系统,因此对于并网瞬态行为的理论研究是十分困难的。实际上,在电网故障时,永磁直驱风力发电系统只需要在电网侧变换器和中间直流环

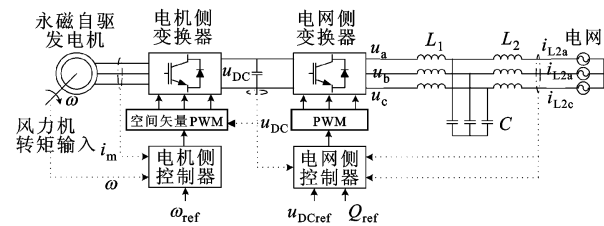


图1 永磁直驱风力发电系统示意图

节采取应对措施,就不会影响发电机及电机侧变换器的正常运行。由此,本文对包括风力机、发电机以及电机侧变换器的整个电机侧部分进行等效简化。

建立系统等效模型的原则是必须确保被等效部分的输出电压及电流特性和原始系统模型相同,并且不改变系统其他部分的结构和控制方法。基于这种等效原则,本文采用受控电流源来替代原系统的整个电机侧部分。模型中受控电流源的电流是由原系统输入功率和直流环节电压决定的,并且电网侧的控制方法和结构与原系统相同,模型如图2所示,其中 $i_{ccs} = P_t / u_{DC}$ 。电网侧变换器的控制方法如图3所示。

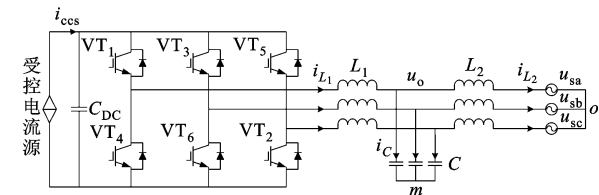


图2 永磁直驱风力发电系统的等效模型

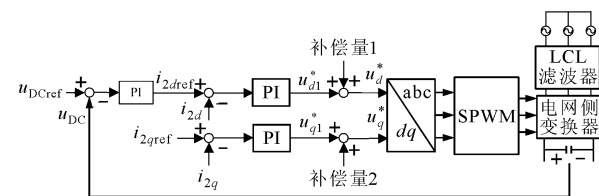


图3 电网侧变换器控制策略

本文设定电流流向电网的方向为系统正方向,系统控制器进行电网电压定向,并采用标么值方法。据此,在 dq 旋转坐标系下,系统的数学模型如下

$$\frac{di_{1d}}{dt} = -\frac{R_1}{L_1}i_{1d} + \omega i_{1q} + \frac{1}{L_1}u_d - \frac{1}{L_1}u_{0d} \quad (1)$$

$$\frac{di_{1q}}{dt} = -\omega i_{1d} - \frac{R_1}{L_1}i_{1q} + \frac{1}{L_1}u_q - \frac{1}{L_1}u_{0q} \quad (2)$$

$$\frac{di_{2d}}{dt} = -\frac{R_2}{L_2}i_{2d} + \omega i_{2q} + \frac{1}{L_2}u_{0d} - \frac{1}{L_2}u_{sd} \quad (3)$$

$$\frac{di_{2q}}{dt} = -\omega i_{2d} - \frac{R_2}{L_2}i_{2q} + \frac{1}{L_2}u_{0q} - \frac{1}{L_2}u_{sq} \quad (4)$$

$$\frac{du_{0d}}{dt} = \left(-\frac{R_1 R_C}{L_1} + \frac{1}{C}\right) i_{1d} + \left(\frac{R_2 R_C}{L_2} - \frac{1}{C}\right) i_{2d} - R_C \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}\right) u_{0d} + \omega u_{0q} + \frac{R_C}{L_1} u_d + \frac{R_C}{L_2} u_{sd} \quad (5)$$

$$\frac{du_{0q}}{dt} = \left(-\frac{R_1 R_C}{L_1} + \frac{1}{C}\right) i_{1q} + \left(\frac{R_2 R_C}{L_2} - \frac{1}{C}\right) i_{2q} - \omega u_{0d} - R_C \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}\right) u_{0q} + \frac{R_C}{L_1} u_q + \frac{R_C}{L_2} u_{sq} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{du_d}{dt} = & -\frac{2.25K_{1p}K_{2p}}{C_{DC}} \frac{i_{1d}u_d}{u_{DC}^2} - \frac{2.25K_{1p}K_{2p}}{C_{DC}} \frac{i_{1q}u_q}{u_{DC}^2} + \\ & \frac{3^{1/2}U_B R_2 K_{2p} - 3^{1/2}U_B L_2 K_{2i}}{0.67 \times 2^{1/2}S_B L_2} \frac{i_{2d}}{u_{DC}} - \frac{3^{1/2}U_B K_{2p}\omega}{0.67 \times 2^{1/2}S_B} \frac{i_{2q}}{u_{DC}} - \\ & \frac{3^{1/2}U_B K_{2p}}{0.67 \times 2^{1/2}S_B L_2} \frac{u_{0d}}{u_{DC}} + \frac{K_{2i}}{0.67} \frac{i_{2dref}}{u_{DC}} + \frac{K_{1p}K_{2p}P_t}{0.67C_{DC}} \frac{1}{u_{DC}^2} + \\ & \frac{K_{1i}K_{2p}u_{DCref}}{0.67} \frac{1}{u_{DC}} + \frac{3^{1/2}U_B K_{2p}u_{sd}}{0.67 \times 2^{1/2}S_B L_2} \frac{1}{u_{DC}} - \frac{K_{1i}K_{2p}}{0.67} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{du_q}{dt} = & \frac{3^{1/2}U_B K_{2p}\omega}{0.67 \times 2^{1/2}S_B} \frac{i_{2d}}{u_{DC}} + \frac{3^{1/2}U_B R_2 K_{2p} - 3^{1/2}U_B L_2 K_{2i}}{0.67 \times 2^{1/2}S_B L_2} \cdot \\ & \frac{i_{2q}}{u_{DC}} - \frac{3^{1/2}U_B K_{2p}}{0.67 \times 2^{1/2}S_B L_2} \frac{u_{0q}}{u_{DC}} + \frac{3^{1/2}U_B K_{2p}u_{sq}}{0.67 \times 2^{1/2}S_B L_2} \frac{1}{u_{DC}} + \\ & \frac{K_{2i}i_{2qref}}{0.67} \frac{1}{u_{DC}} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{2dref}}{dt} = & -\frac{1.5K_{1p}}{C_{DC}} \frac{i_{1d}u_d}{u_{DC}} - \frac{1.5K_{1p}}{C_{DC}} \frac{i_{1q}u_q}{u_{DC}} + \\ & \frac{K_{1p}P_t}{C_{DC}} \frac{1}{u_{DC}} - K_{1i}u_{DC} + K_{1i}u_{DCref} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $i_{L_1} = i_{1d} + j i_{1q}$ 和 $i_{L_2} = i_{2d} + j i_{2q}$ 是 L_1 和 L_2 的电流矢量; $u_o = u_{0d} + j u_{0q}$ 是电容 C 的电压矢量; ω 是电网电压角频率; $u = u_d + j u_q$ 是电网侧变换器的输出电压矢量; $i_2 = i_{2d} + j i_{2q}$ 和 $i_{2ref} = i_{2dref} + j i_{2qref}$ 分别是电网电流矢量和其参考值; u_{DC} 是中间直流环节电压; K_{1p} 和 K_{1i} 分别是 DC 控制器的比例增益和积分增益; K_{2p} 和 K_{2i} 分别是电网电流控制器的比例增益和

积分增益。

由于 PWM 变换器及滤波器的功率损耗很小, 本文忽略了这部分损耗, 因此发电机产生的功率可近似为电机侧变换器的输出功率, 系统输出到电网的功率可近似为电网侧变换器上的功率, 从而直流环节电容 C_{DC} 上的功率可以表示为 $P_{C_{DC}} = P_o - P_t$ 。这里, P_o 和 P_t 分别是系统输出至电网的功率和由发电机产生的功率。其中 $P_{C_{DC}} = i_{DC} u_{DC} = C_{DC} u_{DC} \frac{du_{DC}}{dt}$, $P_o = 1.5(u_d i_{1d} + u_q i_{1q})$, 则直流环节功率平衡关系为

$$C_{DC} u_{DC} \frac{du_{DC}}{dt} = 1.5(u_d i_{1d} + u_q i_{1q}) - P_t \quad (10)$$

由式(1)~式(10), 可以得到描述系统的微分方程, 并重新写成矩阵形式

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}) \quad (11)$$

式中: $\mathbf{f}: R^N \rightarrow R^N$ 是一个光滑向量场; $\mathbf{X}$ 代表系统的状态变量

$$\mathbf{X} = [i_{1d}, i_{1q}, i_{2d}, i_{2q}, u_{0d}, u_{0q}, u_d, u_q, i_{2dref}, u_{DC}]^T$$

2 非线性模态级数建模

对于非线性系统的瞬态行为分析, 非线性模态级数理论是一个有效的方法。采用非线性模态级数法, 可以得到故障穿越运行过程中的并网永磁直驱风力发电系统行为定量的分析结果。模态级数法的基本思想在于获得非线性系统在平衡点附近的状态方程, 并展开成 Taylor 级数, 因此所展开的级数的阶数是和原始系统模型的非线性本质密切相关的。本文展开到二阶级数, 忽略其他高阶项。

2.1 Taylor 级数展开

将式(11)在平衡点处展开成如下形式

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & 0 & 0 & J_{15} & 0 & J_{17} & 0 & 0 & 0 \\ J_{21} & J_{22} & 0 & 0 & 0 & J_{26} & 0 & J_{28} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{33} & J_{34} & J_{35} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{43} & J_{44} & 0 & J_{46} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{51} & 0 & J_{53} & 0 & J_{55} & J_{56} & J_{57} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{62} & 0 & J_{64} & J_{65} & J_{66} & 0 & J_{68} & 0 & 0 \\ J_{71} & J_{72} & J_{73} & J_{74} & J_{75} & 0 & J_{77} & J_{78} & J_{79} & J_{710} \\ 0 & 0 & J_{83} & J_{84} & 0 & J_{86} & 0 & 0 & 0 & J_{810} \\ J_{91} & J_{92} & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{97} & J_{98} & 0 & J_{910} \\ J_{101} & J_{102} & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{107} & J_{108} & 0 & J_{1010} \end{bmatrix} \mathbf{X} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \mathbf{X}^T \mathbf{H}_7 \mathbf{X} \\ \mathbf{X}^T \mathbf{H}_8 \mathbf{X} \\ \mathbf{X}^T \mathbf{H}_9 \mathbf{X} \\ \mathbf{X}^T \mathbf{H}_{10} \mathbf{X} \end{bmatrix} + \dots \quad (12)$$

式中: $\mathbf{X}$ 属于 Taylor 级数收敛域, $\mathbf{X}$ 的系数矩阵是 Jacobian 矩阵 $[\partial f_i / \partial \mathbf{X}]_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_0}$, 代表了线性矢量场; $\mathbf{H}_i$ 是 x_i 的 Hessian 矩阵, 这里 $i=7, 8, 9, 10$ 。

为了得到非线性模态级数法的标准形式, 进行 Jordan 变换, 并得到 $\mathbf{X}$ 的系数矩阵的右、左特征向量矩阵 $\mathbf{U}$ 和 $\mathbf{V}$ 。通过相似变换 $\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{Y}$, 得到如下的

等效形式

$$\dot{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & & & & & & & \\ & \lambda_2 & & & & & & & & \\ & & \lambda_3 & & & & & & & \\ & & & \lambda_4 & & & & & & \\ & & & & \lambda_5 & & & & & \\ & & & & & \lambda_6 & & & & \\ & & & & & & \lambda_7 & & & \\ & & & & & & & \lambda_8 & & \\ & & & & & & & & \lambda_9 & \\ & & & & & & & & & \lambda_{10} \end{bmatrix} \mathbf{Y} + \frac{1}{2} \mathbf{V} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \mathbf{Y}^T \mathbf{U}^T \mathbf{H}_7 \mathbf{U} \mathbf{Y} \\ \mathbf{Y}^T \mathbf{U}^T \mathbf{H}_8 \mathbf{U} \mathbf{Y} \\ \mathbf{Y}^T \mathbf{U}^T \mathbf{H}_9 \mathbf{U} \mathbf{Y} \\ \mathbf{Y}^T \mathbf{U}^T \mathbf{H}_{10} \mathbf{U} \mathbf{Y} \end{bmatrix} + \dots \quad (13)$$

2.2 二阶模态级数

由上述分析,式(13)也可以重新写作为

$$y_i = \lambda_i y_i + \sum_{p=1}^{10} \sum_{q=1}^{10} C_{pq}^i y_p y_q + \dots \quad (14)$$

其中 C_{pq}^i 表示成矩阵形式为

$$\mathbf{C}_{pq}^i = \frac{1}{2} \sum_{k=7}^{10} \mathbf{v}_{ik}^T \cdot [\mathbf{U}^T \mathbf{H}_k \mathbf{U}]$$

考虑到初始条件 $\mathbf{Y}_0 = [y_{10}, \dots, y_{n0}]^T$, 式(14)在麦克劳林收敛域上可以分解为 $y_j(t) = y_{1j}(t) + y_{2j}(t) + y_{3j}(t) + \dots$, 这里 $y_{mj}(t)$ 包含了任意 m 个状态变量在初始条件下相乘的组合项^[8]。这里, 我们可以认为是将系统状态变量考虑成信号, 信号是由若干个基本信号构成的。因此, 展开式应该满足式(14), 并且可以得到

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}_{1j} &= \lambda_j y_{1j} \\ \dot{y}_{2j} &= \lambda_j y_{2j} + \sum_{k=1}^{10} \sum_{l=1}^{10} C_{kl}^j y_{1k} y_{1l} \\ &\vdots \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

本文将系统的解近似到二阶解析解, 研究模式间的二阶非线性交互作用, 从而需求取 $m=1, 2$ 时系统的解析解, 忽略 $y_{3j}(t)$ 和其他高阶项, 并进行一阶和二阶拉普拉斯反变换, 可以得到系统时域解^[8]

$$\begin{aligned} y_j(t) &= y_{1j}(t) + y_{2j}(t) = \\ &= y_{j0} e^{\lambda_j t} + \sum_{k=1}^{10} \sum_{l=1}^{10} C_{kl}^j y_{k0} y_{l0} S_{kl}^j(t) = \\ &= y_{j0} e^{\lambda_j t} + \left\{ \sum_{k=1}^{10} \sum_{l=1}^{10} C_{kl}^j y_{k0} y_{l0} \frac{e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} - e^{\lambda_j t}}{\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j} \right\}_{(k,l,j) \notin R'} + \\ &\quad \left\{ \sum_{k=1}^{10} \sum_{l=1}^{10} C_{kl}^j y_{k0} y_{l0} t e^{\lambda_j t} \right\}_{(k,l,j) \in R'} \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $j=1, 2, \dots, 10$; R' 表示系统发生二阶谐振的条件域。根据 $x_i(t) = \sum_{j=1}^{10} u_{ij} y_j(t)$, 系统的二阶近似响应可以写为

$$\begin{aligned} x_i(t) &= \sum_{j=1}^{10} u_{ij} (y_{j0} - \left\{ \sum_{k=1}^{10} \sum_{l=1}^{10} N_{kl}^j y_{k0} y_{l0} \right\}_{(k,l,j) \notin R'}) e^{\lambda_j t} + \\ &\quad \sum_{j=1}^{10} u_{ij} \left\{ \sum_{k=1}^{10} \sum_{l=1}^{10} N_{kl}^j y_{k0} y_{l0} e^{(\lambda_k + \lambda_l)t} \right\}_{(k,l,j) \notin R'} + \\ &\quad \sum_{j=1}^{10} u_{ij} \left\{ \sum_{k=1}^{10} \sum_{l=1}^{10} C_{kl}^j y_{k0} y_{l0} t e^{\lambda_j t} \right\}_{(k,l,j) \in R'} \end{aligned} \quad (17)$$

这里

$$N_{kl}^j = \frac{C_{kl}^j}{\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j}, \quad j, k, l = 1, 2, \dots, 10$$

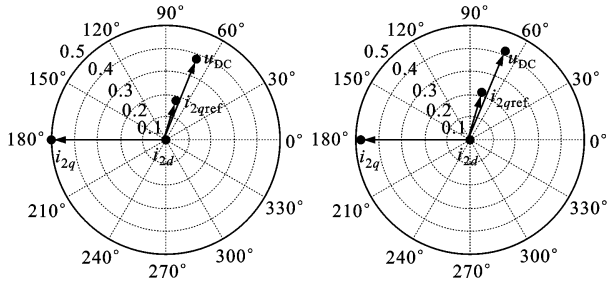
3 瞬态行为分析

本文针对图2所示的风电并网系统模型在故障穿越情况下的瞬态行为进行理论分析。系统在稳态运行0.2 s后发生并网三相接地故障, 并持续0.2 s后恢复电网电压运行。风力发电系统的主要参数为: $R_1=R_2=0.004 \Omega$, $L_1=L_2=1.6 \text{ mH}$, $R_C=1 \Omega$, $C=0.05 \text{ mF}$, $C_{dc}=1.5 \text{ mF}$, $U_g=480 \text{ V}$, $\omega_{ref}=314 \text{ rad/s}$, $U_{dref}=900 \text{ V}$, $i_{2qref}=0 \text{ A}$, $K_{1p}=0.01$, $\tau_{1i}=0.0033$, $P_{wind}=100 \text{ kW}$, $f_{switch}=10 \text{ kHz}$ 。

3.1 特征值分析

运用第2节中得到的 Jacobian 矩阵, 在这一小结中进行系统的特征值分析。系统在故障持续及故障恢复过程均存在10个特征值, 都属于振荡模式。对于风力发电系统而言, 电网侧逆变器的控制模式是很重要的。图4显示, 并网变换器控制模式主要受 i_{2q} 、 i_{2dref} 、 u_{DC} 的影响, 并且在故障恢复过程中, i_{2dref} 、 u_{DC} 的作用在增强, 而 i_{2q} 的作用在减弱。

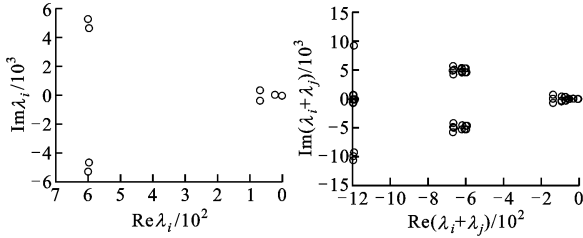
在电力系统中, 对于系统的分析和设计通常是对系统的线性化模型进行分析, 而忽视了可能存在的模式之间的非线性交互作用。实际上, 系统在大扰动情况下的瞬态过程会激励出一系列的振荡模式。图5a、图5b分别给出了系统在故障持续及故障恢复过程中系统线性模式分布和非线性二阶模态



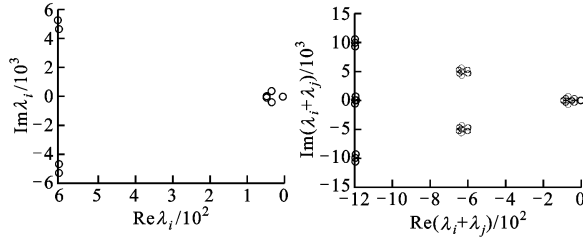
(a) 电网电压跌落过程 (b) 电网电压恢复过程

图4 故障穿越情况下控制模式的模态图

级数方法的系统模式分布。由此可知,系统在大扰动情况下存在大量复杂的振荡模式,而用传统的线性分析方法是不合适的。



(a) 电网电压跌落过程 线性模式 (b) 电网电压跌落过程 二阶模态级数模式



(c) 电网电压恢复过程 线性模式 (d) 电网电压恢复过程 二阶模态级数模式

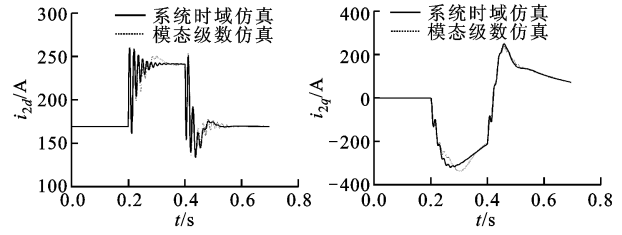
图5 故障穿越过程中线性模式与二阶模态级数模式

3.2 模态级数仿真

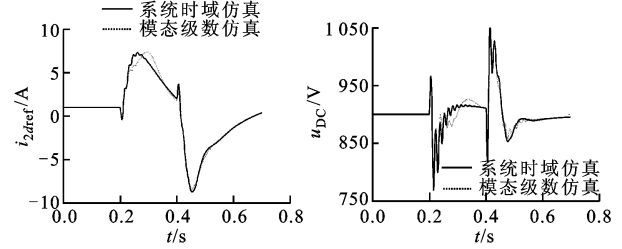
本文通过研究系统输出电流、控制系统参考值和直流电压的瞬态响应,从而对系统运行情况进行评估。永磁直驱风力发电系统故障穿越过程中系统二阶模态级数法仿真结果和系统时域仿真结果的对比如图6所示。从图中可以看出,二阶模态级数法仿真结果误差很小。二阶模态级数的动态行为包含了非线性信息,与非线性时域仿真结果高度吻合,反映了系统的瞬态特性。

3.3 非线性模态交互作用

式(17)中二阶模态时域响应项主要受系数 $\sum_{j=1}^n u_{ij} N_{kl}^j y_{k0} y_{l0}$ 和时间常数 $\tau_{kl} = -1/\text{Re}(\lambda_k + \lambda_l)$ 的



(a) 并网电流 \$d\$ 轴分量 \$i_{2d}\$ (b) 并网电流 \$q\$ 轴分量 \$i_{2q}\$



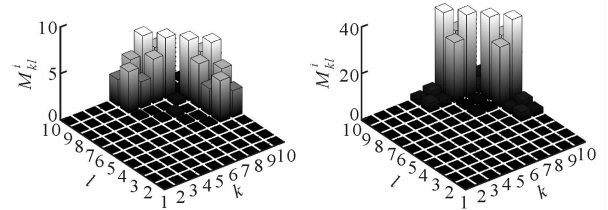
(c) 控制电流 \$d\$ 轴分量 \$i_{2dref}\$ (d) 中间直流环节电压 \$u_{DC}\$

图6 系统时域仿真与模态级数法仿真对比

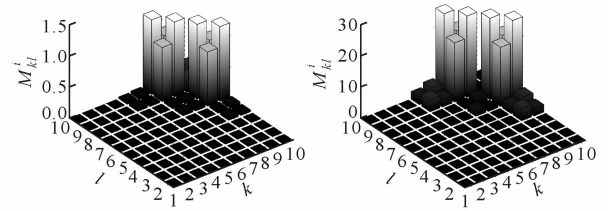
影响,两者的乘积反映了交互模式作用于系统的幅值和持续时间,因此定义为衡量在时域响应中交互模式作用程度的指标,用 M_{kl}^i 表示^[8-9]

$$M_{kl}^i = \left| \sum_{j=1}^n u_{ij} N_{kl}^j y_{k0} y_{l0} / \text{Re}(\lambda_k + \lambda_l) \right| \quad (18)$$

对于非线性系统响应,除了线性模型得到的振荡模式外还有很多交互模式,如 $\lambda_{i,j} = \lambda_i + \lambda_j$ 。为了研究系统在故障穿越过程中 $\lambda_{k,l}$ 交互作用的强弱,基于指标 M_{kl}^i 得到了交互模式作用的强弱指标图,如图7、图8所示。从图中可以看出,系统中存在强交互模式。在强交互模式中, $\lambda_{k,l}$ ($k=5,6,7,8; l=9$) 和 $\lambda_{k,l}$ ($k=9; l=5,6,7,8$) 是相应于交流电路与控制系统



(a) 并网电流 \$d\$ 轴分量 \$i_{2d}\$ (b) 并网电流 \$q\$ 轴分量 \$i_{2q}\$



(c) 控制电流 \$d\$ 轴分量 \$i_{2dref}\$ (d) 中间直流环节电压 \$u_{DC}\$

图7 故障持续过程中交互模式作用的强弱指标图

之间的交互作用,而 $\lambda_{k,l}$ ($k=5,6,7,8;l=10$)和 $\lambda_{k,l}$ ($k=10;l=5,6,7,8$)是交流电路和直流环节之间的交互作用。因此,直流侧与交流侧,以及主电路与控制电路之间的交互作用使得系统的瞬态行为变得比较复杂。

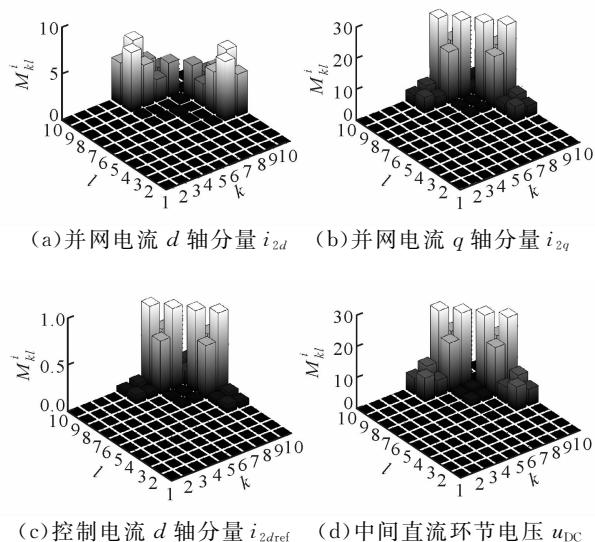


图8 故障恢复过程中交互模式作用的强弱指标图

在实际应用中,为了使系统在故障穿越时的瞬态过程尽量减少波动,因此就需要减弱系统模式之间的强交互作用。本文对系统参数与交互模式之间的关系进行了研究,试图通过调节参数来影响强交互模式。图9、图10所示依次为当系统参数 C_{DC} 、 C 、 L_1 、 L_2 增大时,系统分别在故障持续和故障恢复过程中交互模式作用的变化情况。由图9、图10a、图10b

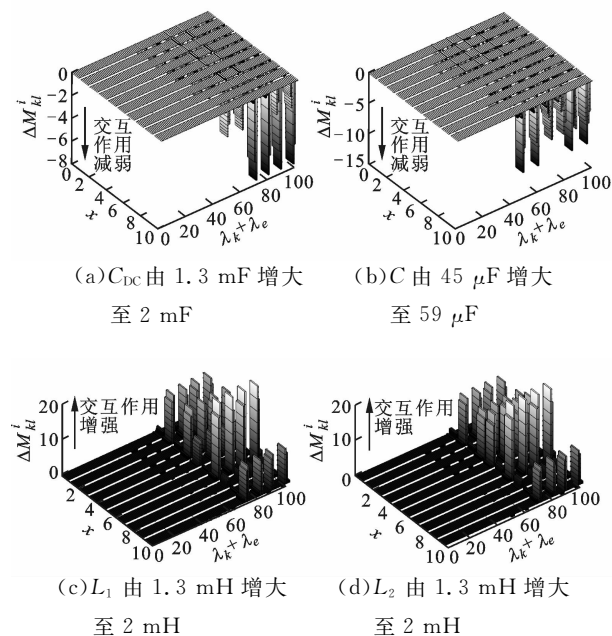


图9 故障持续过程中参数对交互模式的影响

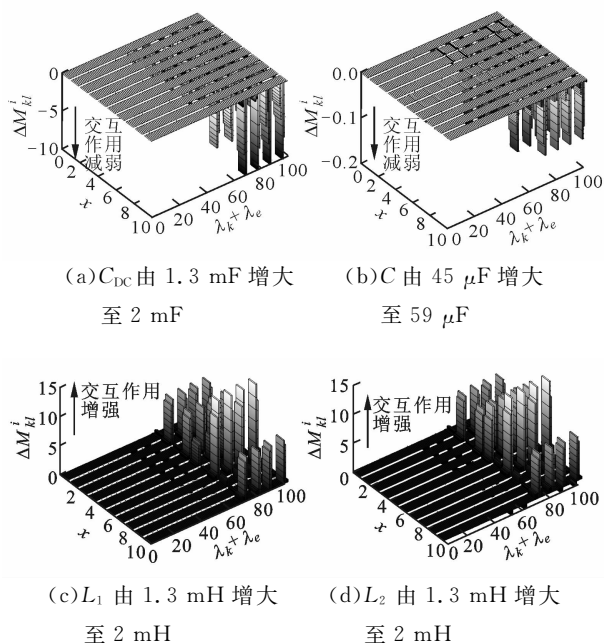


图10 故障恢复过程中参数对交互模式的影响

可知,交互模式的作用随着 C_{DC} 、 C 的增大而减小;由图9和图10c、图10d可知,交互模式的作用随着 L_1 、 L_2 的增大而增强。

此外,图9和图10显示出系统交互模式对于参数的敏感程度是不同的。在故障恢复过程中,系统参数 C_{DC} 、 L_1 和 L_2 对于交互模式的影响很强,而 C 就相对要弱得多。因此,在实际设计中,通过调节系统参数 C_{DC} 、 L_1 和 L_2 ,可以尽快地减小系统瞬态振荡的幅值和持续时间,进而使系统快速恢复稳态。进一步分析可知,在系统故障穿越过程中, C 、 L_1 和 L_2 对交互模式的调节作用是减弱的。

3.4 二阶准谐振边界

通常,在系统设计中应避免谐振的发生,使系统在整个故障穿越过程中快速收敛。因此,如何定义系统二阶谐振边界来避免发生谐振就是一个关键问题。由前面的分析,可以认为当系统参数满足条件 $|\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j| \leq 0.0005|\lambda_j|$ 时即发生二阶谐振,定义为系统准谐振边界,其对参数空间的划分确保了系统运行于正常状态下的系统参数范围。图11分别对系统参数 C_{DC} 、 C 、 L_1 、 L_2 ,给出了在控制系统参数空间 K_{2p} 和积分时间常数的准谐振边界。在图11中,系统边界将参数空间分为正常运行区域和二阶谐振区域。当控制参数选取在正常运行区域时,系统能快速实现稳定运行。当控制参数穿越边界进入二阶谐振区域后,谐振在瞬态过渡过程中将会发生,系统瞬态波形的幅值增大并且持续时间加长。因此,在系统实际运行中,应该确保系统控制参数的选

取始终在图 11 中的灰色区域,这样就可以使系统在故障穿越过程中避免二阶谐振的发生,使各状态变量快速收敛。

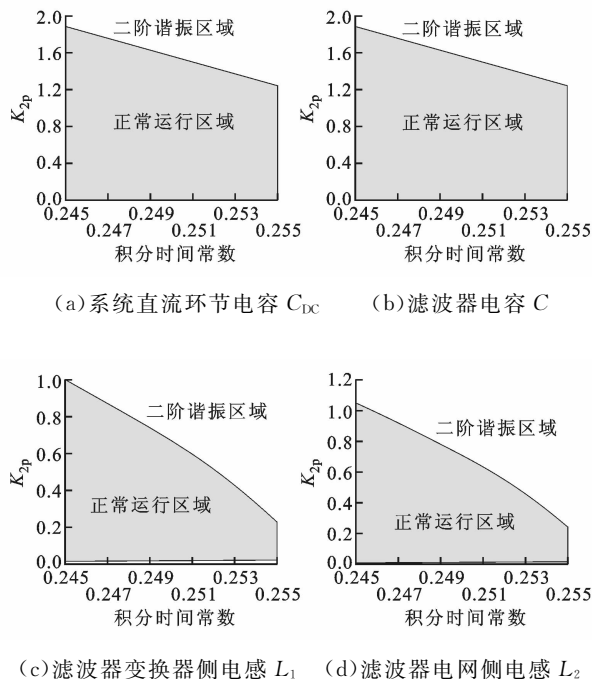


图 11 控制系统参数空间的二阶准谐振边界

4 结 论

本文利用非线性模态级数法,分析了并网永磁同步风力发电系统在故障穿越情况下的瞬态过程。与时域仿真结果比较,证实了非线性模态级数法可以准确地反映系统行为,并能有效地追踪系统的动态响应。分析结果表明,系统在故障穿越过程中是受到线性模式和交互模式共同影响的。通过选取合适的参数,可以降低系统在故障穿越过程中瞬态振荡的幅值和时间。此外,系统二阶准谐振边界可以用于避免系统的瞬态过程发生二阶谐振,为系统运行在正常状态而进行的参数选取提供了有力的工具。

参考文献:

- [1] BAROUDI J A, DINAVAH V, KNIGHT A M. A review of power converter topologies for wind generators [J]. Renewable Energy, 2007, 32(14): 2369-2385.
- [2] 胡书举, 李建林, 许洪华. 永磁直驱风电系统低电压运行特性的分析 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 73-77.
- HU Shuju, LI Jianlin, XU Honghua. Analysis on the low-voltage-ride-through capability of direct-drive permanent magnetic generator wind turbines [J]. Auto-

mation of Electric Power Systems, 2007, 31(17): 73-77.

- [3] 杨晓萍, 段先锋, 钟彦儒. 直驱永磁同步风电机组不对称故障穿越的研究 [J]. 电机与控制学报, 2010, 14(2): 7-12.
- YANG Xiaoping, DUAN Xianfeng, ZHONG Yanru. Asymmetrical faults ride-through of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator [J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(2): 7-12.
- [4] JAUCH C. Transient and dynamic control of a variable speed wind turbine with synchronous generator [J]. Wind Energy, 2007, 10(3): 247-269.
- [5] PARK M, HWANG C, KIM G H, et al. Voltage transient analysis of a PMSG wind power system using controller-hardware-in-the loops [C] // Proceeding of the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 17-19.
- [6] MUYEEN S M, TAKAHASHI R, MURATA T, et al. Transient stability enhancement of variable speed wind turbine driven PMSG with rectifier-boost converter-inverter [C] // Proceeding of the International Conference on Electrical Machine. Vilamoura, Portugal: ICEM, 2008: 400-405.
- [7] SHANECHI H M, PARIZ N, VAAHEDI E. General nonlinear modal representation of large scale power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(3): 1103-1109.
- [8] PARIZ N, SHANECHI H M, VAAHEDI E. Explaining and validating stressed power systems behavior using modal series [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 778-785.
- [9] RODRIGUEZ O, MEDINA A, MESSINA A R, et al. The modal series method and multi-dimensional laplace transforms for the analysis of nonlinear effects in power systems dynamics [C] // IEEE Power & Energy Society General Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 749-756.
- [10] CHINCHILLA M, ARNALTES S, BURGOS J C. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 130-135.
- [11] BELHADJ J, ROBOAM X. Investigation of different methods to control a small variable-speed wind turbine with PMSM drives [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2007, 129(3): 200-213.

(编辑 杜秀杰)