

基于锥互补法的 crowbar 投入 DFIG 风电机组电磁暂态等值

舒进¹, 袁剑², 都劲松¹

(1. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 华能新能源股份有限公司, 北京 100036)

摘要: 为降低对大规模风电机组故障暂态仿真计算量, 首先给出同步坐标系 crowbar 投入 DFIG 风电机组及其机群状态空间模型。其次, 基于 H_∞ 范数最优化动态降阶方法, 提出 DFIG 风电机组等值问题。对参数及运行状态各不相同 DFIG 机群, 在降低原模型状态量数量的同时, 实现阶系统与原模型故障电气量输出范数误差极小化。进一步, 采用 CCA 算法将降阶等值转化为非凸优化问题, 求解降阶等值模型。最后, 针对非平衡初始状态, 给出了等值模型初值的计算方法。仿真结果表明等值计算方法能够在有效实现降阶等值的同时, 定量给出等值模型范数误差。

关键词: DFIG 风电机组; 故障; 等值; 锥互补法; H_∞ 范数

Electromagnetic transient equivalent of DFIG wind generator group with crowbar using CCA

SHU Jin¹, YUAN Jian², DU Jinsong¹

(1. Thermal Power Research Institute, Xi'an 710043, China; 2. Huaneng Renewables Corporation Limited, Beijing 100036, China)

Abstract: In order to reduce the electromagnetic transient simulation of large scale wind generator group, the state space model of DFIG wind generator group with crowbar in synchronous coordinate is introduced firstly, and the equivalent scheme of DFIG wind generator group using H_∞ norm optimization is discussed. The scheme can reduce the state variables and minimize the fault electric quantity H_∞ norm error of the equivalent model and original model, which has the different parameters and states. Then, the Cone Complementary Algorithm which transforms the order reduction to non-convex optimization is presented to get the equivalent model. The initial value of the non-equilibrium equivalent model is decided with a method based on the corresponding differential equality finally. Simulation shows that the proposed scheme can achieve the equivalent model and the reduction error.

Key words: DFIG wind generator; fault; equivalent; CCA; H_∞ norm

0 引言

在加快装机结构转型升级, 积极发展清洁能源的宏观形势下, 2015 年我国新增风电装机 3 050 万 kW, 累计装机 1.45 亿 kW, 同比上升 26.6%。双馈型(Double Fed Induction Generator, DFIG)风电机组广泛应用于华能集团大规模集中式接入风电场。电网故障低电压过程中, DFIG 转子投入 Crowbar 实现低电压穿越(Low voltage ride through, LVRT)将使机组故障电气量与同步水轮或汽轮机产生显著差异^[1-4], 进而对风电场及其接入系统继电保护产生不同程度的影响。基于单台 DFIG 故障分析及计算

表明, Crowbar 投入 DFIG 中含有转频故障电流分量, DFIG 故障后电气量特征与故障前运行方式相关。风电机组单机容量小, 大规模接入风电机组通常包含上千台机组, 各 DFIG 机组容量参数互不相同, 每台机组故障电气量亦有差异。即便是参数相同的同类机组, 因故障前风速与转速互不相同, 各机组故障电流也不一致。直接对每台 DFIG 建模, 经 PSCAD/EMTDC 等软件仿真含电力电子器件的风电机群电磁暂态过程须耗费大量时间。通过 DFIG 机群故障电气量等值获得低阶等值模型, 可有效降低大规模风电接入模型电磁暂态计算量, 对大规模风电接入故障仿真与分析具有重要意义^[5]。但已有的基于风速或者桨距角参量作为风机群划分指标, 建立多机动态等值的方案^[6-8]无法定量给出等值模

型与原模型误差关系, 也不能确定等值模型的最小阶数。

针对 DFIG 机组, 通过分离磁场定向对应的旋转变换初相, 获得同步坐标系 DFIG 状态空间故障模型, 使不同故障初始状态的 DFIG 由线性定常系统描述, 并进一步获得 DFIG 机群状态空间故障暂态模型。其次, 基于 H_∞ 范数最优动态降阶方法^[10], 提出 DFIG 机群等值问题。与 Krylov 子空间类降阶方法相比, 提出的方案可直接给出降阶模型与原模型 H_∞ 范数误差。对参数及运行状态各不相同 DFIG 机群, 在降低原模型状态量数量的同时, 实现降阶模型与原模型故障电气量输出范数误差极小化。

进一步, 采用锥互补法(Cone Complementary Algorithm, CCA)^[11]将等值对应的非凸优化问题转化为线性矩阵不等式组(Linear matrix inequalities, LMIs)进行求解。最后, 针对 Crowbar 投入后 DFIG 机群非平衡初始状态模型, 提出基于零输入响应对应阶数相同的等值模型初值计算方法。

仿真研究中, 在 PSCAD 中建立 3 台容量、参数及故障前转速均不相同的 DFIG 构成的机群, 以单相接地故障为例, 对所提出的等值计算方案进行验证。仿真结果表明等值计算方法可在有效实现等值简化的同时, 实现等值模型范数误差极小化。

1 DFIG 风电机组故障模型

1.1 DFIG 机组模型

忽略 DFIG 转速变化, 采用电动机惯例, 同步坐标系(dq 系)下 DFIG 电磁暂态模型为

$$\begin{cases} \dot{U}_s^{dq} = R_s \dot{I}_s^{dq} + \frac{d\psi_s^{dq}}{dt} + j\omega_1 \psi_s^{dq} \\ \dot{U}_r^{dq} = R_r \dot{I}_r^{dq} + \frac{d\psi_r^{dq}}{dt} + j\omega_s \psi_r^{dq} \\ \dot{\psi}_s^{dq} = L_s \dot{I}_s^{dq} + L_m \dot{I}_r^{dq} \\ \dot{\psi}_r^{dq} = L_r \dot{I}_r^{dq} + L_m \dot{I}_s^{dq} \end{cases} \quad (1)$$

式中: \dot{U}_s^{dq} 、 \dot{I}_s^{dq} 、 $\dot{\psi}_s^{dq}$ 为定子电压、电流、磁链向量, \dot{U}_r^{dq} 、 \dot{I}_r^{dq} 、 $\dot{\psi}_r^{dq}$ 为转子电压、电流、磁链向量; ω_1 为同步速, 转差 $\omega_s = \omega_1 - \omega_r$, ω_r 为转速; R_s 、 R_r 为定、转子电阻; $L_m = 1.5L_{md}$; $L_s = L_m + L_{s\sigma}$, $L_r = L_m + L_{r\sigma}$; L_{md} 为定、转子互感; $L_{s\sigma}$ 、 $L_{r\sigma}$ 为定、转子漏感。

对定子磁链定向 DFIG, 将定子磁链与电压角度初值对应的旋转变换分离, 可避免各机组稳态运行状态差异对旋转变换的影响。由式(1), 机组 i 的状态空间模型为

$$\begin{cases} \frac{dx_i}{dt} = A_i x_i + B_i u_i \\ \dot{i}_i = C_i x_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: $x_i = [\psi_{si}^d \ \psi_{si}^q \ \psi_{ri}^d \ \psi_{ri}^q]^T$, $u_i = [u_{si}^d \ u_{si}^q \ u_{ri}^d \ u_{ri}^q]^T$,

$i_i = [i_{si}^d \ i_{si}^q]^T$;

$$A_i = \begin{bmatrix} -R_{si} \frac{1}{\sigma_{si}} & \omega_1 & R_{si} \frac{L_{mi}}{L_{ri} \sigma_{si}} & 0 \\ -\omega_1 & -R_{si} \frac{1}{\sigma_{si}} & 0 & R_{si} \frac{L_{mi}}{L_{ri} \sigma_{si}} \\ R_{ri} \frac{L_{mi}}{L_{si} \sigma_{ri}} & 0 & -R_{ri} \frac{1}{\sigma_{ri}} & \omega_{si} \\ 0 & R_{ri} \frac{L_{mi}}{L_{si} \sigma_{ri}} & -\omega_{si} & -R_{ri} \frac{1}{\sigma_{ri}} \end{bmatrix},$$

$$B_i = \text{diag}\{VR_i^{-1} \ I_{2 \times 2}\},$$

$$C_i = VR_i \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_{si}} & 0 & -\frac{L_{mi}}{L_{ri} \sigma_{si}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{si}} & 0 & -\frac{L_{mi}}{L_{ri} \sigma_{si}} \end{bmatrix}.$$

其中: $\sigma_{si} = L_{si} - L_{mi}^2/L_{ri}$ 、 $\sigma_{ri} = L_{ri} - L_{mi}^2/L_{si}$; 定子磁链与电压角度初值对应的旋转变换 $VR_i = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{i0}) & -\sin(\alpha_{i0}) \\ \sin(\alpha_{i0}) & \cos(\alpha_{i0}) \end{bmatrix}$, α_{i0} 为机组 i 稳态定子磁链与电压向量夹角。

静止坐标系中, 对定子电压瞬时值进行初相为 0、转速为 ω_1 的 Park 变换, 可得 u_i 。进一步, 由式(2)得 i_i 后, 仅需进行初相为 0、转速为 ω_1 的逆 Park 变换, 即可得到静止坐标系定子电流瞬时值。

1.2 DFIG 机群模型

对 n 台 DFIG 机群经 k 个节点接入电力系统, DFIG 机群接入模型状态空间模型为

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + BU_i \\ I_i = Cx \\ \begin{bmatrix} U_i \\ I_o \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} I_i \\ U_o \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x = [x_1^T, \dots, x_n^T]^T$, $U_i = [u_1^T, \dots, u_n^T]^T$, $I_i = [i_1^T, \dots, i_n^T]^T$; DFIG 接入电网点注入电流、电压向量 $I_o = [i_{o1}^d, i_{o1}^q, \dots, i_{ok}^d, i_{ok}^q]^T$ 、 $U_o = [u_{o1}^d, u_{o1}^q, \dots, u_{ok}^d, u_{ok}^q]^T$; 分块对角阵 $A = \text{diag}\{A_1, \dots, A_n\}$, $B = \text{diag}\{B_1, \dots, B_n\}$,

$C = \text{diag}\{C_1, \dots, C_n\}$, $D = \text{diag}\{D_1, \dots, D_n\}$; DFIG 机组并网端口与机群接入电网端口间电网第一类混合参数矩阵为 $H = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}$ 。

由式(3), n 台 DFIG 机群接入电网模型 S 为

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = A_s x + B_s U_o \\ I_o = C_s x + D_s U_o \end{cases} \quad (4)$$

式中: $A_s = A + BH_{11}C$; $B_s = BH_{12}$; $C_s = H_{21}C$; $D_s = H_{22}$ 。

2 DFIG 机群接入等值

2.1 基于 H_∞ 范数最优化等值

基于 H_∞ 范数最优化等值问题为: 存在矩阵 \tilde{A}_s 、 \tilde{B}_s 、 \tilde{C}_s 、 \tilde{D}_s , 对初值 x_0 , 使 $k(k \ll n)$ 阶系统 S'

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{x}}{dt} = \tilde{A}_s \tilde{x} + \tilde{B}_s U_o \\ \tilde{I}_o = \tilde{C}_s \tilde{x} + \tilde{D}_s U_o \end{cases} \quad (5)$$

与系统 S 误差 $\|e\|_\infty = \|S - S'\|_\infty$ 极小化。

定理 1^[10]: 对零初始状态($x=0$)系统(4), 若存在正定阵 X 、 $Y \in R^{n \times n}$ 及标量 $\gamma > 0$, 满足:

$$A_s X + X A_s^T + \frac{B_s B_s^T}{\gamma} < 0 \quad (6)$$

$$A_s^T Y + Y A_s + \frac{C_s^T C_s}{\gamma} < 0 \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix} \geq 0 \quad (8)$$

$$\text{rank} \begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix} \leq n + k \quad (9)$$

则存在等值系统 S' 与系统 S 误差满足 $\|e\|_\infty < \gamma$, 等值系统 S' 系数矩阵为

$$\begin{cases} \tilde{A}_s = (N^T L^{-1} N)^{-1} [I - N^T L^{-1} A_s^T N] \\ \tilde{B}_s = -(N^T L^{-1} N)^{-1} N^T L^{-1} Y B_s \\ \tilde{C}_s = -C_s L^{-1} A_s^T N - C_s L^{-1} N (N^T L^{-1} N)^{-1} \times \\ \quad [I - N^T L^{-1} A_s^T N] \\ \tilde{D}_s = D_s - C_s L^{-1} [I - N (N^T L^{-1} N)^{-1} N^T L^{-1}] Y B_s \end{cases} \quad (10)$$

式中: $L = A_s^T Y + Y A_s$, m 阶($m < k$)列满秩阵 N 满足 $NN^T = Y - X^{-1}$ 。

2.2 等值误差分析

对 k 阶等值系统 S' , 其与系统 S 误差 $\|e\|_\infty$ 上、下界 γ_{ub} 、 γ_{lb} 为^[12]

$$\begin{cases} \gamma_{ub} = 2 \sum_{j=k+1}^n \sigma_j(G(S)) \\ \gamma_{lb} = \sigma_{k+1}(G(S)) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\sigma_n(G(S)) \leq \dots \leq \sigma_1(G(S))$ 。 $\sigma_j(G(S))$ 为系统 S 的 Hankel 奇异值。

2.3 锥互补算法

H_∞ 范数最优化等值可由求解 LMIs(6)~(9) 获得。与输出反馈线性鲁棒控制器综合类似, 由于存在附加的矩阵秩约束(9), 最优化等值属于非凸优化问题。采用文献[11]提出的 CCA 方法将 LMIs(6)~(9) 转化为非凸优化问题:

$$\begin{cases} \text{目标函数: } \min \text{Tr}(XY) \\ \text{约束条件: (6)~(8)} \end{cases} \quad (12)$$

非凸优化(12)的解, 可通过迭代求解一组凸优化得到, 计算步骤如下:

(1) 对标量 $\gamma > 0$, 给定满足约束(6)~(8)的正定阵初值 X_0 、 Y_0 , 如不存在, 退出迭代。令 $k=0$;

(2) 求解凸优化(13), 得 X_{k+1} 、 Y_{k+1} ;

$$\begin{cases} \text{目标函数: } \min \text{Tr}(Y_k X_{k+1} + X_k Y_{k+1}) \\ \text{约束条件: (6)~(8)} \end{cases} \quad (13)$$

(3) 若满足迭代终止条件, $X = X_{k+1}$ 、 $Y = Y_{k+1}$ 退出迭代。否则, 令 $k=k+1$, 返回(2)。

2.4 等值算法

等值问题(5)的最优解通常不易获得, DFIG 机群接入系等值可由二分法获得误差 $\|e\|_\infty$ 的次优解 γ_{subopt} , 计算步骤如下:

(1) 对式(4)定义的模型 S , 给定等值模型 S' 阶数 k 及迭代误差终止条件 ε 。

(2) 由式(11)得等值误差上下界初值 γ_{ub} 、 γ_{lb} 。
 $\gamma = \gamma_{ub}$ 。

(3) 计算 $tol = (\gamma_{ub} - \gamma_{lb}) / \gamma_{lb}$, 若 $tol < \varepsilon$ 且 $\text{rank} \begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix} \leq n + k$, 终止迭代, 令 $\gamma_{subopt} = \gamma$ 。否则, 进入(4)。

(4) 令 $\gamma = (\gamma_{ub} + \gamma_{lb}) / 2$, 执行 CCA 算法(12), 得 X 、 Y 。

(5) 令 $n_r = \text{rank} \begin{bmatrix} X & I \\ I & Y \end{bmatrix} - n$ 。若 $n_r > k$, $\gamma = \gamma_{ub}$; 否则, $\gamma = \gamma_{lb}$ 。返回(3)。

对次优解 γ_{subopt} 及 X 、 Y , 由式(10)得等值模型 S' 。

3 等值模型初值

线性模型全响应由零状态响应及零输入响应构成。通过求解 H_∞ 范数的最优化等值问题(5), 仅

可实现零初始状态等值模型 \mathbf{S}^* 与模型 \mathbf{S} 误差范数极小化。然而, 对非零初始状态模型 \mathbf{S} 及初值 \mathbf{x}_0 , 应选择适当的等值模型 \mathbf{S}^* 初始状态 $\tilde{\mathbf{x}}_0$, 使两模型零输入响应一致, 以极小化 \mathbf{S}^* 与 \mathbf{S} 的全响应误差。

模型 \mathbf{S} 的零输入响应 m 阶导数为

$$\frac{d^m \mathbf{I}_o}{dt^m} = \mathbf{C}_s \mathbf{A}_s^m \mathbf{x}_0 \quad (14)$$

由等值模型 \mathbf{S}^* 与模型 \mathbf{S} 零输入响应及前 m 阶导数相等, 得等值模型 \mathbf{S}^* 初始状态:

$$\tilde{\mathbf{x}}_0 = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}_s \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}_s \tilde{\mathbf{A}}_s^m \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s \mathbf{x}_0 \\ \vdots \\ \mathbf{C}_s \mathbf{A}_s^m \mathbf{x}_0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

通常选择 $m=3\sim 4$ 。即可使等值模型与原模型零输入响应一致。

4 仿真算例

针对多机一变风电机组, 在 PSCAD/EMTDC 中建立 DFIG 接入模型模型如图 1。3 台参数及故障前运行状态各不相同的 1.5 MW DFIG 经 0.69 kV 母线汇集后经箱变升压至 35 kV, 再经汇集母线升压至 220 kV 接入模型, $t=0$ s 时, 在 0.69 kV 汇集线路发生经 10Ω 过渡电阻单相接地, 故障后 Crowbar 立刻投入。模型参数见附录。

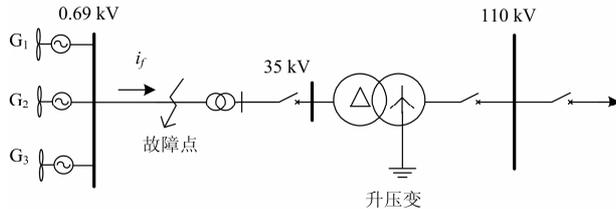


图 1 DFIG 接入系统模型

Fig. 1 Power system with DFIG

3 台 DFIG 机组共计 12 个状态变量, 由故障前潮流可得 G1~G3 机组状态量初值。原模型状态空间系数阵及状态量初值见附录。

选 $m=3$, 给定不同降阶模型阶数, 采用文中算法得到 6 阶等值模型参数及初值为

$$\tilde{\mathbf{G}}_s = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{A}}_s & \tilde{\mathbf{B}}_s \\ \tilde{\mathbf{C}}_s & \tilde{\mathbf{D}}_s \end{bmatrix};$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_s = \begin{bmatrix} -9.448 & -314.3 & 14.76 & 15.61 & -29 & -1.2 \\ 314.3 & -9.449 & -15.6 & 14.77 & 1.201 & -29.02 \\ 7.001 & -7.625 & -27.84 & -13.61 & 49.88 & -47.1 \\ 7.626 & 7.004 & 13.61 & -27.87 & 47.08 & 49.9 \\ -1.823 & 0.07887 & -11.47 & -12.14 & -26.21 & 47.35 \\ -0.08084 & -1.825 & 12.16 & -11.44 & -47.35 & -26.25 \end{bmatrix};$$

$$\tilde{\mathbf{B}}_s = \begin{bmatrix} -560.6 & -176 & 7.636 & 2.719 \\ -176 & 560.6 & 2.72 & -7.583 \\ 3.176 & -2.126 & 247.7 & -130.6 \\ -2.082 & -3.226 & -130.6 & -247.8 \\ 0.6849 & 2.168 & -35.51 & 63.63 \\ 2.102 & 0.6896 & 63.63 & 35.59 \end{bmatrix};$$

$$\tilde{\mathbf{C}}_s = \begin{bmatrix} -17.39 & -5.244 & 13.52 & 27.49 & -27.95 & -9.72 \\ -5.243 & 17.39 & 27.47 & -13.53 & -9.715 & 27.97 \end{bmatrix};$$

$$\tilde{\mathbf{D}}_s = \begin{bmatrix} 0.2209 & 0.3244 & 0.5379 & -0.08255 \\ -0.2875 & 0.2308 & 0.09643 & 0.489 \end{bmatrix}.$$

$$\tilde{\mathbf{x}}_0 = [1.0069 \ 0.3314 \ 0.2899 \ 0.4184 \ -0.1088 \ -0.0377]^T.$$

不同阶数等值模型特征参数如表 1 所示。

表 1 等值模型特征参数

Table 1 Characteristic parameters of equivalent system

等值阶数	[γ_{lb}, γ_{ub}]	γ_{subopt}	均方根误差/kA		
			A 相	B 相	C 相
7	[0.390, 229.76]	14.12	0.123	0.130	0.141
6	[0.392, 312.71]	17.47	0.578	0.567	0.535
5	[53.64, 1179]	53.92	2.832	2.892	2.862

由表 1 可知, 等值模型与原模型 H_∞ 范数误差与等值模型阶数直接相关, 等值模型阶数越低, 二者误差越大。

对 6 阶等值模型, 迭代过程中 γ 变化情况如图 2 所示, A 相接地故障各相短路电流如图 3 所示, 图中给出故障前两周期电流波形, 等值模型状态空间系数阵及初值见附录。

由图 2、图 3 可知, 6 阶等值模型与原模型输出具有很高的一致性。等值模型与原模型 H_∞ 范数误差 17.47, 三相电流误差均方根最大值为 0.578 kA。

若进一步将原模型简化为 5 阶等值模型, 迭代过程中 γ 收敛情况如图 4 所示, A 相接地故障各相短路电流如图 5 所示, 图中给出故障前两周期电流波形。

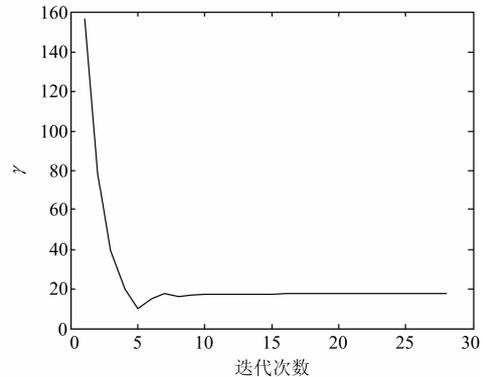


图 2 6 阶等值 γ 迭代变化

Fig. 2 γ Convergence with $k=6$

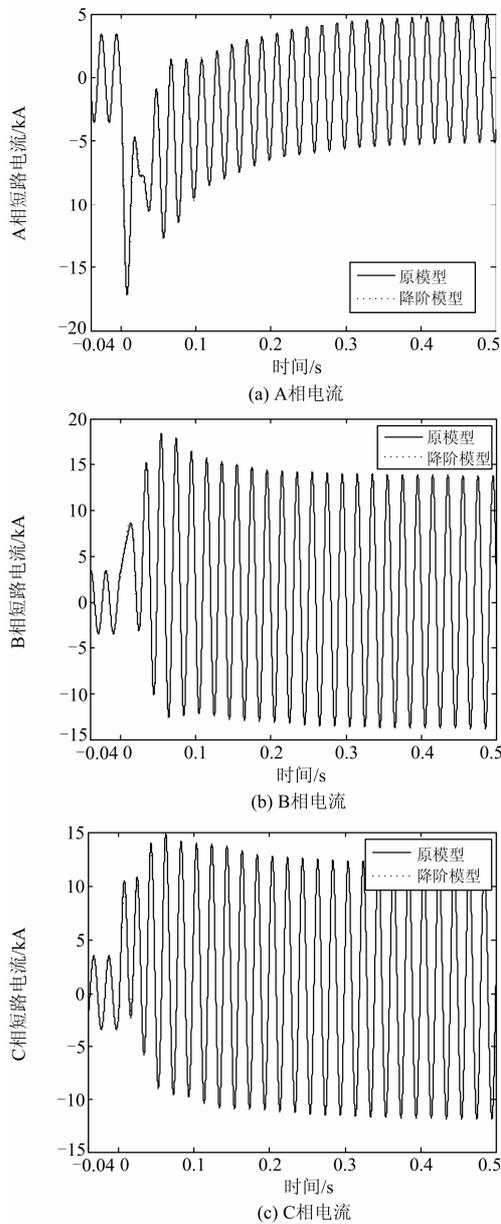


图 3 6 阶等值模型 A 相接地短路电流
Fig. 3 Current of phase A fault with $k=6$

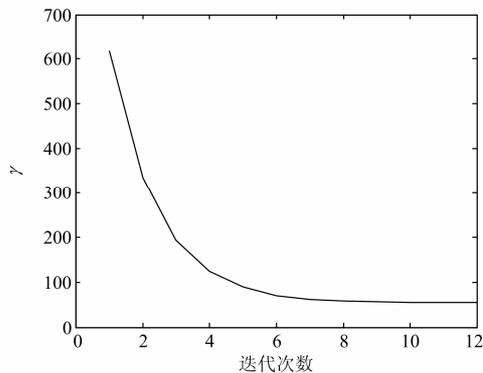


图 4 5 阶等值 γ 迭代变化
Fig. 4 γ convergence with $k=5$

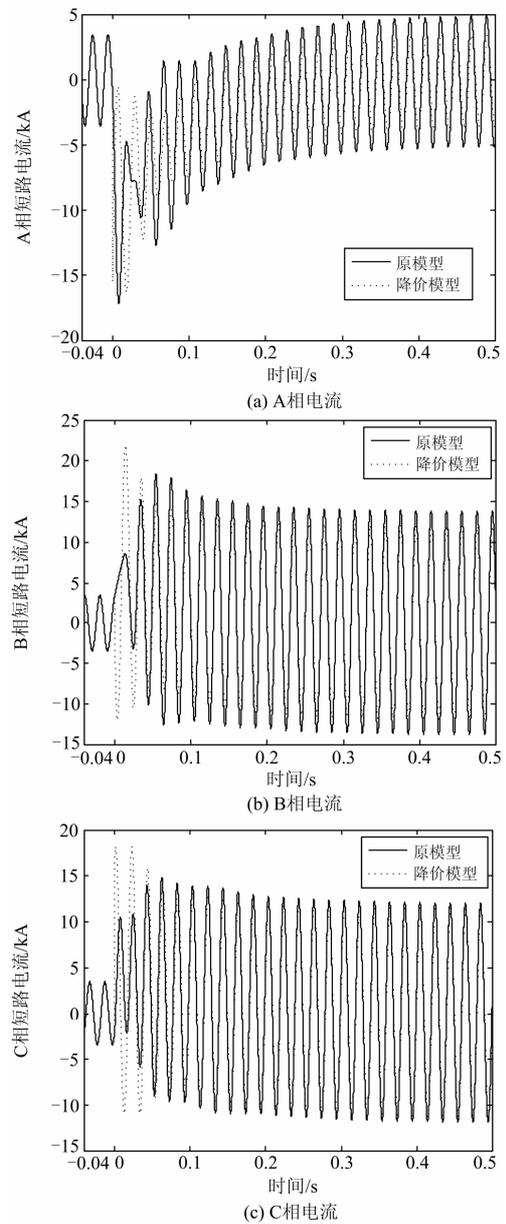


图 5 5 阶等值模型 A 相接地短路电流
Fig. 5 Current of phase A fault with $k=5$

由图 4、图 5 可知，5 阶等值模型与原模型输出差别较大。等值模型与原模型范数误差 53.92，三相电流误差均方根最大值为 2.892 kA。

5 阶等值模型的误差 H_∞ 范数界 $[\gamma_{lb}, \gamma_{ub}] = [53.64, 1179]$ ，这是原模型自身特性所决定的，优化后 $\gamma_{subopt} = 53.92$ ，已接近 5 阶等值模型误差下限。换言之，对于算例中的 3 机系统，等值模型阶数必须大于 5，否则等值模型与原模型故障电流误差将增长至不可接受的程度。

5 结论

通过分离初相旋转，crowbar 投入 DFIG 风电机

组可描述为线性模型。

仿真研究表明采用 H_∞ 范数最优化动态降阶方法并通过 CCA 算法求取阶等值模型。可实现等值模型与原模型误差极小化。基于零输入相应阶导数一致, 可计算等值模型的初值, 以保证原模型与降阶模型短路电流的一致。

模型自身特性对其等值模型阶数的选取有直接影响, 通过各阶等值模型误差的分析, 可确定等值模型最低阶数, 从而有效控制等值模型与原模型误差。

附录

1 DFIG 及系统参数(机组额定容量基准)

附表 1.1 DFIG 模型参数

Table 1.1 Parameters of DFIG

参数	G1	G2	G3
风速/m/s	12	9.3	10
故障前转速/p.u.	1.2	0.9	1.0
额定容量/MVA	1.632	1.632	1.632
定转子匝数比	0.3663	0.3663	0.3663
定子阻抗/ Ω	0.01+j0.1817	0.01+j0.1517	0.01+j0.1517
转子阻抗/ Ω	0.01+j0.144	0.01+j0.144	0.01+j0.144
定转子互阻抗/ Ω	5.896	5.496	5.496
转动惯量时间常数/s	3.6	3.6	3.6
撬棒电阻/ Ω	0.05	0.05	0.05

2 原模型状态空间系数及初值

原模型状态空间系数:

$$\mathbf{G}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_s & \mathbf{B}_s \\ \mathbf{C}_s & \mathbf{D}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & & & \mathbf{B}_1 \\ & \mathbf{A}_2 & & \mathbf{B}_2 \\ & & \mathbf{A}_3 & \mathbf{B}_3 \\ \mathbf{C}_1 & \mathbf{C}_2 & \mathbf{C}_3 & \mathbf{D}_1 + \mathbf{D}_2 + \mathbf{D}_3 \end{bmatrix}.$$

其中:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} -8.826 & 314.2 & 8.685 & 0 \\ -314.2 & -8.826 & 0 & 8.685 \\ 23.37 & 0 & -23.75 & -62.83 \\ 0 & 23.37 & 62.83 & -23.75 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} -9.734 & 314.2 & 9.567 & 0 \\ -314.2 & -9.734 & 0 & 9.567 \\ 25.67 & 0 & -26.11 & 31.42 \\ 0 & 25.67 & -31.42 & -26.11 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} -9.734 & 314.2 & 9.567 & 0 \\ -314.2 & -9.734 & 0 & 9.567 \\ 25.67 & 0 & -26.11 & 25.13 \\ 0 & 25.67 & -25.13 & -26.11 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0.001132 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0.001132 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0.001019 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0.001019 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} 0.001042 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0.001042 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 3.77 & 3331 & -3.71 & -3277 \\ -3331 & 3.77 & 3277 & -3.71 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 3.745 & 3673 & -3.68 & -3610 \\ -3673 & 3.77 & 3610 & -3.68 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C}_3 = \begin{bmatrix} 3.827 & 3673 & -3.762 & -3610 \\ -3673 & 3.827 & 3610 & -3.762 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{D}_1 = \mathbf{D}_2 = \mathbf{D}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

原模型初值:

$$\mathbf{x}_0 = [\mathbf{x}_{01} \quad \mathbf{x}_{02} \quad \mathbf{x}_{03}]^T$$

$$\mathbf{x}_{01} = [\psi_{s1}^d \quad \psi_{s1}^q \quad \psi_{r1}^d \quad \psi_{r1}^q] = \begin{bmatrix} 0 & -0.0018 & 0.0004 & -0.0018 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{x}_{02} = [\psi_{s2}^d \quad \psi_{s2}^q \quad \psi_{r2}^d \quad \psi_{r2}^q] = \begin{bmatrix} 0 & -0.0018 & 0.0003 & -0.0018 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{x}_{03} = [\psi_{s3}^d \quad \psi_{s3}^q \quad \psi_{r3}^d \quad \psi_{r3}^q] = \begin{bmatrix} 0 & -0.0018 & 0.0003 & -0.0018 \end{bmatrix}.$$

参考文献

- [1] 郑涛, 魏占朋, 李娟, 等. 计及撬棒保护的双馈风电机组不对称短路电流特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 7-13.
ZHENG Tao, WEI Zhanpeng, LI Juan, et al. Unsymmetrical short circuit current analysis of doubly fed induction generator with crowbar protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 7-13.
- [2] 撤奥洋, 张哲, 尹项根. 双馈风力发电系统故障特性及保护方案构建[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 233-239.
HAN Aoyang, ZHANG Zhe, YIN Xianggen. Research on

- fault characteristic and grid connecting point protection scheme for wind power generation with doubly fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 233-239.
- [3] 张学广, 徐殿国, 李伟伟. 双馈风力发电机三相短路电流分析[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(5): 493-497.
ZHANG Xueguang, XU Dianguo, LI Weiwei. Analysis of three-phase short circuit current of doubly fed induction generator[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(5): 493-497.
- [4] SULLA F, SVENSSON J, SAMUELSSON O. Symmetrical and unsymmetrical short-circuit current of squirrel-cage and doubly-fed induction generators[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81: 1610-1618.
- [5] 张元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.
ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [6] 蒙晓航, 叶林, 赵永宁. 永磁直驱同步风电场多机动态等值模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 25-32.
MENG Xiaohang, YE Lin, ZHAO Yongning. Dynamic multi-machine equivalent model of direct drive permanent magnet[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 25-32.
- [7] FERNANDEZ L M, JURADO F, SAENZ J R. Aggregated dynamic model for wind farms with doubly fed induction generator wind turbines[J]. Renewable Energy, 2008, 33(1): 129-140.
- [8] 苏勋文. 风电场动态等值建模方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010.
SU Xunwen. Research on dynamic equivalent modeling of wind farms[J]. Baoding: North China Electric Power University, 2010.
- [9] 张保会, 李光辉, 王进. 风电接入对继电保护的影响(二)—双馈式风电场电磁暂态等值建模研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 1-7.
ZHANG Baohui, LI Guanghui, WANG Jin. Impact of wind farm integration on protection relay (2): study on DFIG-based wind farm electromagnetic transient equivalent model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 1-7.
- [10] WU F, JARAMILLO J. Numerical algorithm for model reduction of polytopic uncertain linear systems[C] // Proceedings of the American Control Conference, 2002, Anchorage, Alaska: 1748-1752.
- [11] GHAOUI L E, AITRAMI M. A cone complementary algorithm for static output-feedback and related problems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1993, 42: 1171-1172.
- [12] GLOVER K. All optimal Hankel-norm approximations of linear multivariable systems and their L_∞ -error bounds[J]. International Journal of Control, 1984, 39(6): 1115-1193.

收稿日期: 2015-11-30; 修回日期: 2016-03-22

作者简介:

舒进(1983-), 男, 工学博士, 高级工程师, 主要从事风力发电相关研究工作。E-mail: shujin@tpri.com.cn

(编辑 张爱琴)