

计及撬棒投切的双馈风电机组精细化整定计算等值模型

吴志鹏^{1,2}, 李银红^{1,2}

(1. 华中科技大学 电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;
2. 华中科技大学 电气与电子工程学院 电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:目前在双馈风电机组(DFIG)的等值模型研究中尚未建立简单、精确的模型,无法满足整定计算建模的要求,为此提出了计及撬棒投切的精细化DFIG整定计算等值模型。首先对网侧变流器的影响进行分析,建立了相应的等值模型;随后通过对DFIG的状态空间方程以及转子侧变流器无功控制方程求解,给出定子短路电流的表达式。在此基础上结合整定计算建模的特点,对定子输出短路电流进行分解,得到了撬棒投入阶段和切除阶段的DFIG等值模型。撬棒投入阶段模型可用于主保护阶段整定计算建模,切除阶段则可用于后备保护阶段的建模。最后通过仿真验证了等值模型的正确性。

关键词:双馈风电机组;撬棒保护;网侧变流器;整定计算;等值模型

中图分类号:TM 315

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202007010

0 引言

风能作为优质的绿色能源,近年来发展迅猛。在现有的风力发电机类型中,双馈风电机组(DFIG)是目前的主流机型之一,应用广泛^[1]。随着风电并网容量的增加,故障阶段风电对电网保护性能的影响问题日益凸显。继电保护整定计算是给定保护装置定值、保证电网安全稳定运行的重要基础性工作,建立适用于整定计算的精细化DFIG等值模型对风电并网具有重要意义^[2-3]。

电网发生故障导致DFIG机端电压跌落严重时,转子绕组将产生较大的暂态电流。为了保护变流器不被损坏,通常采用在转子侧投切撬棒电路并动作转子侧变流器(RSC)的低电压穿越LVRT(Low-Voltage Ride-Through)策略。在撬棒电路投入期间,DFIG以异步电机状态运行,从电网吸收大量的无功;为满足现行风电场并网规范中风电机组在故障期间为电网提供无功支撑的要求,在暂态电流降至安全值后撬棒电路立即切除,同时重启RSC并启用无功控制策略。撬棒电路在故障阶段的动作特点使得DFIG的短路特性相比传统同步发电机有着明显的差异。

目前,国内外对计及撬棒投切的DFIG短路特性进行了广泛的研究:文献[4-5]基于不同的假设条件,对DFIG的动态方程进行解析得到了撬棒投入后定子输出短路电流的计算方法;文献[6-8]从DFIG的动态方程出发,对其进行变换、化简得到了DFIG的序网络等值电路,可用于求解DFIG接入系统后的电流分布。但这些方法应用于DFIG的整定计算建模时存在一些问题:①现有研究基本忽略了撬棒投入阶段网侧变流器(GSC)对DFIG输出短路电流的贡献,而GSC的额定容量约为DFIG额定容量的1/3,

忽略GSC的影响可能使DFIG输出短路电流的计算值不准确,从而降低保护定值的精度;②撬棒切除阶段RSC采用无功控制策略,并占用了DFIGLVRT阶段的大部分时间,但目前关于该阶段DFIG短路特性的研究较少,未对该阶段进行精确有效的建模。

为解决上述问题,本文提出了适用于整定计算的计及撬棒投切的DFIG精细化等值模型,推导了撬棒投入阶段的GSC稳态输出短路电流表达式;基于DFIG动态过程和RSC无功控制策略,得出了故障后全过程的定子短路电流表达式;基于DFIG故障后不同阶段与主后备保护动作时间的对应关系和整定计算建模的特点,确定了适用于整定计算的DFIG精细化等值模型。该模型能够综合考虑DFIG故障后撬棒投切的全过程:在撬棒投入阶段,计及了GSC的影响,提高了主保护整定计算DFIG模型的精度;在撬棒切除稳态阶段,基于RSC的无功控制策略,填补了后备保护整定计算DFIG模型的空缺。仿真算例验证了该模型的正确性。

1 DFIG动态数学模型

DFIG的简化系统如图1所示。DFIG定子端与电网相连,转子端通过背靠背双脉冲宽度调制(PWM)变流器与电网相连。正常运行工况下,DFIG的运行转差率约在-0.3~0.3之间。采用电动机常用

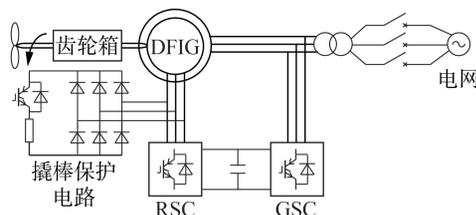


图1 含有撬棒保护电路的DFIG简化模型

Fig.1 Simplified model of DFIG with Crowbar circuit

作的正序等值电路里增加近似为GSC容量额定值的恒无功功率源。

3 DFIG 定子短路电流解析式推导

3.1 撬棒投入阶段定子短路电流解析式推导

从检测到故障至撬棒动作仅需1~2 ms,一般认为撬棒在故障时刻 t_0 瞬时投入^[12]。取 $t_0=0$,故障后DFIG端口电压的空间矢量形式可表示为:

$$\mathbf{u}_s^s = \mathbf{V}_{s1} e^{j\omega_s t} = \mathbf{V}_{s1}^s e^{j\omega_s t} \quad (6)$$

其中, \mathbf{V}_{s1} 为故障后端口电压正序相量。

在不考虑直流母线箝位效应时,转子侧串入撬棒回路可以等价为转子侧电压 u_r 跳变为0,且转子等效电阻增大至 $R'_r = R_r + R_{cb}$ (R_{cb} 为折算到定子侧后的撬棒电阻阻值)^[13]。式(3)转变为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_s^s \\ \psi_r^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s/L'_s & R_s L_m / (L'_s L_r) \\ R'_r L_m / (L'_r L_s) & -R'_r/L'_r + j\omega_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_s^s \\ \psi_r^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{u}_s^s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(7)可以抽象为 $dx/dt = \mathbf{A}x + \mathbf{u}$,该类方程的解可以表示为有电压激励的特解和无电压激励的通解之和的形式,如式(8)所示。

$$\boldsymbol{\psi} = \boldsymbol{\psi}_p + \boldsymbol{\psi}_h \quad (8)$$

其中, $\boldsymbol{\psi}_p$ 为磁链的特解; $\boldsymbol{\psi}_h$ 为磁链的通解。

$\boldsymbol{\psi}_p$ 的求解本质是对电压跌落后的稳态磁链进行求解,由于 $R_s \ll j\omega_s L_s$,因而可忽略定子电阻。将式(6)代入式(7)得定子、转子磁链特解分别为:

$$\boldsymbol{\psi}_{sp}^s = \mathbf{V}_{s1}^s e^{j\omega_s t} / (j\omega_s) \quad (9)$$

$$\boldsymbol{\psi}_{rp}^s = k_s R'_r \mathbf{V}_{s1}^s e^{j\omega_s t} / [j\omega_s (R'_r + js\omega_s L'_r)] \quad (10)$$

其中, $s = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s$,为转差率; $k_s = L_m / L_s$,为定子励磁系数。

根据现代控制理论的知识, $\boldsymbol{\psi}_h$ 可由式(11)给出。

$$\boldsymbol{\psi}_h = e^{\mathbf{A}t} \boldsymbol{\psi}_{h0} \quad (11)$$

其中, $e^{\mathbf{A}t}$ 为状态转移矩阵,参考现代控制理论的知识易求解; $\boldsymbol{\psi}_{h0}$ 为磁链通解的初值,可由式(4)、(8)、(9)、(10)联立求解得到。故障后DFIG磁链的全响应解析式为:

$$\boldsymbol{\psi}_s^s = \boldsymbol{\psi}_{s(1)}^s e^{\lambda_1 t} + \boldsymbol{\psi}_{s(3)}^s e^{j\omega_s t} \quad (12)$$

$$\boldsymbol{\psi}_r^s = \boldsymbol{\psi}_{r(1)}^s e^{\lambda_1 t} + \boldsymbol{\psi}_{r(2)}^s e^{\lambda_2 t} + \boldsymbol{\psi}_{r(3)}^s e^{j\omega_s t} \quad (13)$$

其中, $\boldsymbol{\psi}_{s(1)}^s$ 、 $\boldsymbol{\psi}_{s(3)}^s$ 、 $\boldsymbol{\psi}_{r(1)}^s$ 、 $\boldsymbol{\psi}_{r(2)}^s$ 、 $\boldsymbol{\psi}_{r(3)}^s$ 的表达式见附录中的式(A1)、(A2); λ_1 、 λ_2 为式(7)中状态矩阵的特征根。

投入不同撬棒大小,特征根 λ_1 、 λ_2 的虚部 ω_1 、 ω_2 分别接近于0和 ω_r ^[4],可近似为:

$$\begin{cases} \omega_1 = \text{Im}(\lambda_1) \approx 0 \\ \omega_2 = \text{Im}(\lambda_2) \approx \omega_r \end{cases} \quad (14)$$

特征根 λ_1 、 λ_2 的实部与投入撬棒大小有关,定、转子衰减时间常数需要修正。综合式(14),特征根 λ_1 、 λ_2 可以用式(15)近似表示^[14]。

$$\begin{cases} \lambda_1 = -(1+\mu)/T_s \\ \lambda_2 = -1/T'_r + j\omega_r \end{cases} \quad (15)$$

$$\mu = -L_m^2 (R'_r)^2 / \{ L_s L_r [(R'_r)^2 + (L'_r)^2 (1-s)^2] \} \quad (16)$$

其中, $T_s = L'_s / R_s$,为定子衰减时间常数; $T'_r = L'_r / R'_r$,为转子衰减时间常数; μ 为修正系数。

综合式(12)、(13)可知,撬棒投入后DFIG定子磁链由稳态的基频分量和衰减的直流分量组成,此外转子磁链还含有衰减的转子频分量。随着投入撬棒阻值的增大, μ 增大,直流分量衰减常数变大;此外, R'_r 的增大将使转子频分量衰减常数变小。

联立式(2)、(12)、(13)、(15),并依据式(6)将空间矢量形式转化为相量形式,求得定子电流解析式为:

$$\mathbf{I}_s = \mathbf{I}_{s(1)} e^{-\frac{(1+\mu)t}{T_s}} + \mathbf{I}_{s(2)} e^{-\frac{t}{T'_r}} e^{j\omega_s t} + \mathbf{I}_{s(3)} e^{j\omega_s t} \quad (17)$$

其中, $\mathbf{I}_{s(1)}$ 、 $\mathbf{I}_{s(2)}$ 、 $\mathbf{I}_{s(3)}$ 分别见附录中的式(A3)—(A5)。

由式(17)可知,投入撬棒后DFIG定子短路电流将同时存在稳态的基频分量、衰减的直流分量和衰减的转子频分量。稳态基频电流分量为故障后端口电压对DFIG作用的稳态分量。衰减直流分量由定子绕组维持定子磁链初值不变产生,由于定子电阻一般比较小,因而直流分量的衰减速度较慢。衰减转子频电流分量由转子暂态直流磁链分量以转子速切割定子绕组产生,投入撬棒使转子等效电阻增大很多,因而转子频电流分量的衰减速度很快。正是由于转子频分量在暂态过程中的快变特性,因此撬棒投入后的暂态过程十分复杂。

3.2 撬棒切除稳态阶段定子短路电流解析式推导

国内外有一些文献对RSC控制策略作用下DFIG的暂态过程进行了数学描述,但数学解析式均比较复杂;且合理的控制器结构、参数可以较好地抑制该暂态过程。考虑到整定计算建模的实用性,本文仅分析RSC无功控制的稳态阶段。

RSC控制结构由功率外环与电流内环组成。在故障阶段,功率外环断开,内环电流参考值由LVRT策略直接给定。电流内环控制框图与图2相似,本文不再赘述。基于电网电压定向的定子输出有功、无功功率可以表述为:

$$\begin{cases} P_s \approx \frac{3L_m}{2L_s} V_{s1} i_{rd} \\ Q_s \approx -\frac{3V_{s1}}{2\omega_s L_s} (V_{s1} + \omega_s L_m i_{rq}) \end{cases} \quad (18)$$

其中, P_s 、 Q_s 分别为定子输出的有功、无功功率; V_{s1} 为定子电压空间矢量的幅值; i_{rd} 、 i_{rq} 分别为转子的 d 、 q 轴电流。

根据我国最新的风电并网标准GB/T 19963—2011的要求,故障期间风电机组需要优先为电网提

供无功支撑。风电场注入系统的无功电流为^[15]:

$$I_Q \geq K_d(0.9 - V_{s1}) \quad 0.2 \text{ p.u.} \leq V_{s1} \leq 0.9 \text{ p.u.} \quad (19)$$

其中, I_Q 为无功电流的标么值; K_d 为无功增益系数, $K_d \geq 1.5$ 。

根据无功电流的定义及风电并网规范对定子电流的要求, 将式(19)代入式(18), 可求解转子电流参考值为:

$$\begin{cases} i_{iq}^* \leq \frac{(\omega_s L_s K_d - 1)V_{s1} - 0.9 \omega_s L_s K_d}{\omega_s L_m} \\ i_{id}^* = \sqrt{I_{RSC_lim}^2 - (i_{iq}^*)^2} \end{cases} \quad (20)$$

其中, i_{iq}^* 、 i_{id}^* 分别为转子 q 、 d 轴电流参考值; I_{RSC_lim} 为 RSC 电流限制值。

将式(20)中的 i_{iq}^* 进行变形, 形式如下:

$$i_{iq}^* \leq \frac{L_s K_d V_{s1} \left[\left(1 - \frac{1}{\omega_s L_s K_d} \right) - \frac{0.9}{V_{s1}} \right]}{L_m} \quad (21)$$

典型 DFIG 参数中, $L_s > 1 \text{ p.u.}$, 由 V_{s1} 的取值可知, i_{iq}^* 恒小于 0, 符合向电网发出无功的控制策略要求。在给定的端口电压取值范围内, 端口电压越小, i_{iq}^* 的绝对值越大。表 1 给出了典型 DFIG 参数下不同电压跌落时的 i_{iq}^* , 表中参数均为标么值。由于端口电压降不大时, 撬棒不动作; 撬棒动作时, 不考虑电流指令的限制值情况, 电压降与 q 轴电流指令值呈线性关系, 故表 1 仅给出端口电压为 0.3~0.6 p.u. 时的 i_{iq}^* 。

表 1 $K_d = 1.5$ 时不同端口电压下的 i_{iq}^*

Table 1 Values of i_{iq}^* under different port voltages when K_d is 1.5

端口电压	Q_s	i_{iq}^*	端口电压	Q_s	i_{iq}^*
0.6	0.27	-0.684	0.4	0.30	-0.934
0.5	0.30	-0.810	0.3	0.27	-1.059

撬棒动作时端口电压的跌落较为严重, 从表 1 可以看出, 端口电压跌落至额定值的一半时, 若要满足并网标准要求, q 轴电流参考值至少要达到额定电流的 81%, 电网对无功的需求要远大于有功。因此, 在整定建模中可以忽略转子电流 d 轴分量, 转子电流可以表示为:

$$i_r^s = j i_{iq}^* e^{j(\omega_s t + \varphi_0)} = j \frac{(\omega_s L_s K_d - 1)V_{s1} - 0.9 \omega_s L_s K_d}{\omega_s L_m} e^{j(\omega_s t + \varphi_0)} \quad (22)$$

其中, φ_0 为故障初始相位。

将式(22)代入式(1)、(2)解得端口电压相量与电流相量的关系为:

$$V_{s1} = j I_{s1} / K_d + 0.9 e^{j\varphi_0} \quad (23)$$

其中, I_{s1} 为端口电流相量; V_{s1} 的相位 $\varphi_{s1} = \varphi_0$ 。

4 计及撬棒投切的 DFIG 精细化整定计算模型

4.1 DFIG 整定计算建模特征

传统同步发电机在整定计算建模中常通过捕捉故障瞬间的电气量, 将其等效为一个静止元件^[16]。但 DFIG 的故障特性与传统同步发电机组相比具有明显的差异性。撬棒投入后 DFIG 暂态过程中含有较快衰减的转子频分量, 导致其暂态变量变化迅速。且转子频分量在故障初期幅值较大, 忽略它将会造成较大误差^[8]。撬棒切除后, DFIG 在 RSC 无功控制策略的影响下将表现出与撬棒投入阶段完全不同的短路特性。因而原有针对同步发电机的整定计算建模方法已经无法适用于 DFIG 的建模。

图 4 在同一时间轴上展示了 DFIG 故障典型阶段以及保护动作的时限配合关系。图中, t_c 为撬棒退出运行时刻; t_1 为故障被清除时刻; Δt_c 为撬棒投入阶段时间, 一般为 20~60 ms^[17]; Δt_1 为撬棒切除阶段时间; t^I 为保护 I 段动作时刻; t^{II} 为保护 II 段动作时刻; 故障发生至主保护 I 段动作之间一般还存在 1~2 个工频周期的延迟; Δt 为 I、II 段保护动作配合延时, 典型值为 0.3~0.5 s。从图 4 可以看出, 撬棒投入的时间短, 撬棒投入阶段与瞬时动作的主保护作用阶段一致; 撬棒切除后, RSC 进行稳态无功控制, 该阶段与经过 Δt 延时后的后备保护作用阶段一致。

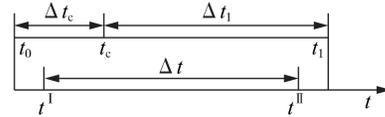


图 4 DFIG 故障典型阶段及保护动作时限配合关系

Fig.4 Typical fault stage of DFIG and time limit coordination relationship of protection operation

因此, 本文提出应针对主保护和后备保护分别进行建模, 即主保护采用撬棒投入瞬间 DFIG 的 2 种周期分量用于建模, 后备保护则采用撬棒切除阶段的 RSC 进行无功控制的 DFIG 模型。

4.2 DFIG 精细化整定计算模型推导

4.2.1 适用于主保护的模型推导

根据 4.1 节的分析, 在主保护整定模型中将同时考虑定子稳态基频分量、暂态转子频分量和 GSC 稳态基频分量的作用, 按照频率不同分别进行等效。

(1) DFIG 基频等值电路如图 5(a) 所示。DFIG 输出的基频电流分量由 GSC 部分和定子部分线性叠加, 因而 DFIG 基频等值电路可由 GSC 等值电路和定子端等值电路并联而成。GSC 输出稳态的无功电流, 等值电路可用一个受控电流源 I_{GSC} 表示, 表达式如式(5)所示。定子端的等值电路与普通异步电机相同, 可用一个等值阻抗 Z_{s1} 进行等效, $Z_{s1} = V_{s1} / I_{s(3)}$ 。

(2) 短路电流转子频分量大小与故障后的端口电压有关,可用 $I_{s(2)} = f(V_{s1})$ 表达。进而转子频等值电路同样可以用一个受控电流源等效,如图 5(b) 所示,该受控电流源的表达式为 $I_{st1} = I_{s(2)} = f(V_{s1})$ 。

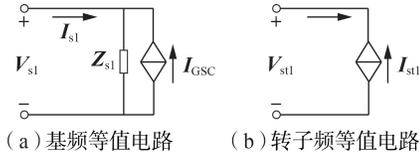


图 5 DFIG 主保护等值电路

Fig.5 Equivalent circuit of main protection of DFIG

由图 5 可知,DFIG 主保护基频等值电路与传统发电机次暂态模型存在一定的差别:传统同步发电机可以用恒定注入电流源与次暂态电抗并联模型等效,而在 DFIG 主保护等值电路中恒定电流源则变为了受 DFIG 端口电压控制的电流源。因此,基频分量的短路计算需要首先求解 DFIG 端口电压。以三相短路故障为例,用阻抗矩阵表示的 DFIG 端口节点 i 、故障节点 j 电压方程分别为:

$$\begin{cases} V_i = \sum_{j \in G_s} Z_{ij} I_{SG,j} + Z_{ii} I_{GSC} + Z_{if} I_f \\ 0 = \sum_{j \in G_s} Z_{jf} I_{SG,j} + Z_{jf} I_{GSC} + Z_{ff} I_f \end{cases} \quad (24)$$

其中, V_i 为 DFIG 端口电压; G_s 为传统同步发电机接入节点的集合; $I_{SG,j}$ 为第 j 台同步发电机恒定注入电流源; I_f 为故障点注入电流; Z_{ij} 为节点 i 、 j 间的互阻抗; Z_{ji} 为节点 j 、 i 间的互阻抗; Z_{ii} 、 Z_{ff} 分别为节点 i 、 f 的自阻抗; Z_{if} 、 Z_{fi} 为节点 i 、 f 间的互阻抗。

联立式 (24)、(5), 求解 DFIG 端口电压 V_i 的一元二次方程得 DFIG 的端口电压, 从而将 DFIG 基频等值电路转化为传统次暂态模型形式、转子频等值电路转化为电流源模型形式。再利用传统的故障分析方法, 易求得 DFIG 电流基频分量和转子频分量的分布。考虑到撬棒投入时间较短, 将故障开始时刻的转子频电流相量作为等效电流源。因此, 主保护整定计算模型可由等效电流源并联阻抗模型和等效电流源模型叠加而成。

4.2.2 适用于后备保护的模型推导

在撬棒切除阶段 RSC 提供稳定的无功电流, DFIG 只需要建立基频等值电路, 其等值电路可以用电势源阻抗模型进行等效, 解析式如式 (25) 所示。

$$\begin{cases} E_{eq} = 0.9 e^{j\varphi_0} \\ Z_{eq} = j \frac{1}{K_d} \end{cases} \quad (25)$$

其中, E_{eq} 为等值电势; Z_{eq} 为等值阻抗。

综上所述, DFIG 适用于后备保护的等值电路如图 6 所示, 与传统发电机次暂态模型类似。

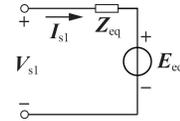


图 6 DFIG 后备保护等值电路

Fig.6 Equivalent circuit of backup protection of DFIG

5 仿真实验

为验证第 4 节推导的 DFIG 精细化整定计算模型的正确性, 在 MATLAB / Simulink 中建立如图 7 所示的 DFIG 经传输线并入电网的仿真模型。其中, DFIG 群额定功率为 6×1.5 MW, 额定电压为 575 V, 额定转速为 1.2 p.u., 具体参数见附录中的表 A1; 传输线长度为 30 km, T_1 、 T_2 为 2 台升压变压器, 120 kV 理想电网的等值电抗 $X_s = 1$ p.u.; 三相短路故障点设置在传输线的初始端。

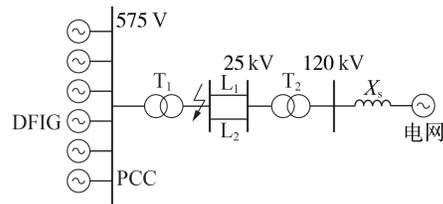


图 7 DFIG 并入电网的仿真模型

Fig.7 Simulation model of DFIG accessed to power grid

故障及 DFIG 动作全过程为: $t = 0.1$ s 时传输线初始端发生三相短路故障, 致使 DFIG 端口电压发生跌落; DFIG 瞬时投入阻值为 0.1 p.u. 的撬棒电路, 设置不同的投入时间 Δt_c ; 然后撬棒电路被切除, 同时 RSC 启动无功控制策略直至故障被清除。

图 8 展示了不同 Δt_c 下, 三相短路故障前、撬棒

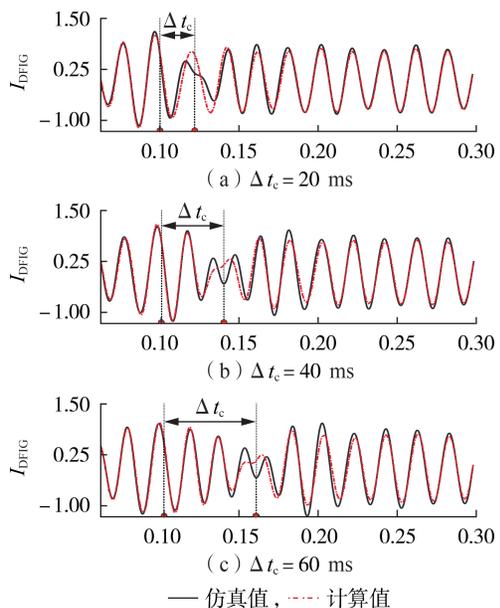


图 8 DFIG 侧 A 相短路电流波形

Fig.8 Phase-A short circuit current waveforms of DFIG

投入、撬棒切除3个阶段DFIG侧滤除直流分量后电流A相波形的仿真值和计算值(均为标么值)。

由图可见,不同 Δt_c 下撬棒切除阶段的暂态过程均较短,验证了前述忽略该暂态过程假设的适用性;不同 Δt_c 情形下,撬棒投入时的定子电流波形的仿真值与计算值均十分吻合;撬棒切除后,除了初始时的暂态过程存在一定误差外,稳定阶段仿真值和计算值的波形基本吻合,验证了本文推导的不同阶段DFIG输出电流表达式的有效性。

为进一步说明本文所推导的DFIG整定计算模型的有效性,下面以 $\Delta t_c = 20 \text{ ms}$ 为例,求出DFIG送出线路各阶段整定计算用短路电流周期分量的计算值、仿真值;并与忽略GSC贡献电流、异步电机模型的计算结果进行对比,结果如表2所示,表中短路电流均为标么值。

表2 短路电流周期分量的计算值和仿真值结果

Table 2 Calculated and simulative values of short circuit current periodic component

保护阶段	短路电流 仿真结果	短路电流计算结果		
		本文模型	忽略GSC	异步电机 模型
主保护阶段	1.314	1.351	0.951	0.670
后备保护阶段	0.765	0.750	0.750	—

现有电网短路计算常把撬棒动作的DFIG作为普通异步电机处理^[18-19]。异步电机模型由于没有考虑撬棒切除过程,无法用于撬棒切除后的后备保护阶段。从表2中可以看到,本文模型计算所得的短路电流与仿真结果较为相近,而忽略GSC的作用将给短路电流计算带来较大的误差。后备保护阶段的仿真结果与计算结果较为接近,本文推导的RSC无功控制稳态模型能较为准确地反映撬棒切除阶段的故障过程。与常用的异步电机模型相比,本文推导的模型从精确度和适用范围2个维度上均更加精细化。因此,本文推导的DFIG等值模型能较好地应用于撬棒投切全过程中的DFIG精细化整定计算。

6 结论

本文针对现有DFIG等值模型应用于整定计算中存在的问题,提出了计及撬棒投切的DFIG精细化整定计算等值模型,该模型适用于计及DFIG的整定计算全过程。本文主要结论如下:

(1)在撬棒投入阶段,不能简单地忽略GSC的影响。当GSC参与LVRT时,忽略其提供的短路电流将造成较大的误差。为精确地表达故障电流,可以将GSC等效为一个受端口电压控制的电流源。

(2)计及DFIG接入的继电保护整定计算需要对主保护和后备保护分别建模。主保护采用撬棒投入阶段的等值模型,由电流源并联阻抗的基频等值模

型和等效电流源的转子频等值模型组成;后备保护采用撬棒切除阶段的等值模型,为电势源阻抗模型。

(3)本文提出的模型综合考虑了GSC短路电流、转子频电流分量以及撬棒电路状态对DFIG短路电流的影响,相比普通异步电机模型,其能更加准确地反映故障阶段电气量的特性。将该模型运用于整定计算中,在保证计算效率的同时,提高了整定计算的计算精度,从而降低了保护误动作的风险。

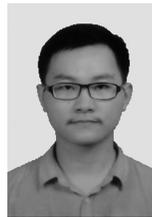
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 翟佳俊,张步涵,谢光龙,等. 基于撬棒保护的双馈风电机组三相对称短路电流特性[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 18-23.
ZHAI Jiajun, ZHANG Buhuan, XIE Guanglong, et al. Three-phase symmetrical short-circuit current characteristics analysis of wind turbine driven DFIG with Crowbar protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 18-23.
- [2] 何志勤,张哲,尹项根,等. 电力系统广域继电保护研究综述[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(5): 125-130.
HE Zhiqin, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Overview of power system wide area protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(5): 125-130.
- [3] EFTHYMIADIS A E, ROENNSPIESS O E, GUERRA J A. Simulation of protective relay performance under short-circuit and transient swing conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1990, 26(6): 1108-1115.
- [4] 孔祥平,张哲,尹项根,等. 计及撬棒保护影响的双馈风力发电机组故障电流特性研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 1-10.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study of fault current characteristics of DFIG considering impact of Crowbar protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 1-10.
- [5] 潘文霞,杨刚,刘明洋,等. 考虑Crowbar电阻的双馈电机短路电流计算[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3629-3634.
PAN Wenxia, YANG Gang, LIU Mingyang, et al. Calculation of short-circuit current of DFIG with the considering of Crowbar resistance[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3629-3634.
- [6] 雷洪,王晓阳,刘亚东,等. 适用于后备保护整定计算的阶段式发电机模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 183-191.
LEI Qi, WANG Xiaoyang, LIU Yadong, et al. Stage generator model for backup protection setting calculation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 183-191.
- [7] HOWARD D F, HABETLER T G, HARLEY R G. Improved sequence network model of wind turbine generators for short-circuit studies[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(4): 968-977.
- [8] 张金华,张保会,陈琳浩,等. 基于序网等值电路的双馈风电机组接入系统短路电流计算方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 19-25.
ZHANG Jinhua, ZHANG Baohui, CHEN Linhao, et al. Short circuit current calculation method of power system integrated with DFIG based on equivalent sequence circuits[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 19-25.
- [9] 贺益康,胡家兵,徐烈. 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京:中国电力出版社, 2012: 77-79.
- [10] 贺益康,胡家兵. 双馈异步风力发电机并网运行中的几个热点问题[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27): 1-15.

- HE Yikang, HU Jiabing. Several hot-spot issues associated with the grid-connected operations of wind-turbine driven doubly fed induction generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(27): 1-15.
- [11] 袁晓冬, 邱志鹏, 李群, 等. 双馈型风电机组网侧换流器无功功率调节控制策略[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(8): 16-19.
YUAN Xiaodong, QIU Zhipeng, LI Qun, et al. Reactive power regulation strategy for grid-side converter of doubly-fed induction generator in wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8): 16-19.
- [12] 邹志策, 肖先勇, 刘阳, 等. 考虑撬棒保护接入的双馈感应发电机转子磁链动态特性[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 22-29.
ZOU Zhice, XIAO Xianyong, LIU Yang, et al. Rotor flux dynamic characteristics of doubly-fed induction generator with Crowbar protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 22-29.
- [13] 周宏林, 杨耕. 不同电压跌落深度下基于撬棒保护的双馈式风机短路电流特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(增刊): 184-191.
ZHOU Honglin, YANG Geng. Short circuit current characteristics of doubly fed induction generator with Crowbar protection under different voltage dips[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(Supplement): 184-191.
- [14] 付元欢, 李银红, 何璇, 等. 电网故障下计及撬棒保护的双馈感应发电机暂态解析修正模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4591-4600.
FU Yuanhuan, LI Yinong, HE Xuan, et al. Corrected transient analysis model of doubly fed induction generator with Crowbar protection under grid fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4591-4600.
- [15] 杨国生, 王增平, 欧阳金鑫, 等. 考虑低电压穿越全过程的双馈风电机组短路电流计算方法[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2185-2193.
YANG Guosheng, WANG Zengping, OUYANG Jinxin, et al. Short-circuit current calculation method of DFIGWT considering entire LVRT process[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2185-2193.
- [16] 李玮, 尹刚志, 东立荣. 继电保护整定计算中故障计算模型的选择和形成[J]. 华北电力技术, 2010(5): 25-28.
LI Wei, YIN Gangzhi, DONG Lirong. Selection and formulation of fault calculation model for power relay protection calculation[J]. North China Electric Power, 2010(5): 25-28.
- [17] 姜惠兰, 周陶, 贾燕琪, 等. 提高DFIG低电压穿越性能的转子Crowbar自适应切除控制方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 93-98.
JIANG Huilan, ZHOU Tao, JIA Yanqi, et al. Adaptive deactivating control strategy of Crowbar for LVRT capability enhancement of DFIG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 93-98.
- [18] 沈枢, 张沛超, 方陈, 等. 双馈风电场故障序阻抗特征及对选相元件的影响[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 87-92.
SHEN Shu, ZHANG Peichao, FANG Chen, et al. Characteristics of sequence impedance of DFIG plant and influence on phase selector[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 87-92.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 三相交流系统短路电流计算 第1部分: 电流计算: GB/T 15544.1—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.

作者简介:



吴志鹏

吴志鹏(1997—),男,江西上饶人,硕士研究生,主要研究方向为新能源发电接入与继电保护(E-mail:wuzhipeng@hust.edu.cn);

李银红(1976—),女,湖北武汉人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护整定计算和直流保护故障特性分析与整定等(E-mail:liyinhong@hust.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Precise DFIG equivalent model for setting calculation based on activated stage and deactivated stage of Crowbar protection

WU Zhipeng^{1,2}, LI Yinong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Simple and accurate model has not been established in current equivalent model research of DFIG (Doubly-Fed Induction Generator), which cannot meet the requirement of setting calculation and modeling. In order to solve this problem, a precise DFIG equivalent model for setting calculation based on activated stage and deactivated stage of Crowbar protection is proposed. Firstly, the influence of GSC (Grid-Side Converter) is analyzed, and the corresponding equivalent model is established. Then the expression of stator short circuit current is obtained by solving the state space equation of DFIG and reactive power control equation of RSC (Rotor-Side Converter). Based on this, combining the characteristic of setting calculation model, the stator short circuit current is decomposed, and then the DFIG equivalent models of Crowbar in activated stage and deactivated stage are obtained. The DFIG model of Crowbar in activated stage can be used for setting calculation of main protection, while the model in deactivated stage can be used for setting calculation of backup protection. Finally, simulative results verify the correctness of the equivalent model.

Key words: DFIG; Crowbar protection; grid-side converter; setting calculation; equivalent model

附录

表 A1 单台 DFIG 参数

Table A1 Parameters of single DGIG

参数	参数值	参数	参数值
额定功率/MW	1.5	定子漏感	0.18
额定电压/V	575	转子漏感	0.16
额定频率/Hz	50	定子电阻	0.023
激磁电感	2.9	转子电阻	0.016

注：激磁电感、定子漏感、转子漏感、定子电阻、转子电阻均为标么值。

$$\psi_{sh0} = \frac{V_{s0}}{j\omega_s} - \frac{V_{s1}}{j\omega_s}, \quad \psi_{th0} = \frac{L_r}{j\omega_s L_m} [V_{s0} - j\omega_s L'_s I_{s0}] - \frac{k_s R'_r V_{s1}}{j\omega_s (R'_r + js\omega_s L'_r)}, \quad \psi_{s(1)}^s = \psi_{sh0}, \quad \psi_{s(3)}^s = \frac{V_{s1}}{j\omega_s} \quad (A1)$$

$$\psi_{r(1)}^s = -\frac{k_s}{T'_r (-\frac{1}{T'_r} + j\omega_r)} \psi_{sh0}, \quad \psi_{r(2)}^s = \left(\frac{k_s}{T'_r (-\frac{1}{T'_r} + j\omega_r)} \psi_{sh0} + \psi_{th0} \right), \quad \psi_{r(3)}^s = \frac{k_s R'_r V_{s1}}{j\omega_s (R'_r + js\omega_s L'_r)} \quad (A2)$$

$$I_{s(1)} = \frac{V_{s0} - V_s}{j\omega_s L'_s} + \frac{k k_s r}{(-1 + j\omega_r T'_r)} \frac{V_s - V_0}{j\omega_s L'_s} \quad (A3)$$

$$I_{s(2)} = -\frac{k_r}{L'_s} \left(\frac{k_s}{(-1 + j\omega_r T'_r)} \frac{V_{s0} - V_{s1}}{j\omega_s} + \psi_{r0} - \frac{k_s R'_r V_{s1}}{j\omega_s (R'_r + js\omega_s L'_r)} \right) \quad (A4)$$

$$I_{s(3)} = \frac{V_{s1}}{R_s + j\omega_s L_{s\sigma} + \frac{j\omega_s L_m \left(j\omega_s L_{r\sigma} + \frac{R'_r}{s} \right)}{j\omega_s L_r + \frac{R'_r}{s}} \quad (A5)$$