基于序网等值电路的双馈风电机组接人系统 短路电流计算方法

张金华,张保会,陈琳浩,郝治国 (西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049)

摘要:为了方便和准确地计算双馈风电机组(DFIG)接入系统的短路电流分布,提出了投撬棒后 DFIG 的工频 和转频序网等值电路,并给出了利用该等值电路计算系统短路电流的方法。通过求解投撬棒后 DFIG 磁链的 状态微分方程,得到其工频分量和转频分量的解析表达式。在此基础上,将 DFIG 的电压空间矢量方程按转频 和工频分量进行分解,并根据空间矢量与相量间的关系,分别形成了转频和工频序网等值电路。其中,转频正 序、负序等值电路分别为带内阻抗的电势和无源阻抗,而工频正序、负序等值电路均为无源阻抗。利用该等值 电路只需已知 DFIG 的电机参数和故障初值条件而无需仿真即可求得 DFIG 接入系统各处的短路电流。以某 DFIG 接入系统为例,通过 PSCAD 仿真验证了该等值电路和短路计算方法在不同故障条件下的有效性。 关键词: 双馈风电机组: 撬棒保护: 短路电流: 序网电路: 等值电路: 转速频率

中图分类号: TM 614 文献标识码:A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.01.003

引言 0

近年来风力发电技术发展迅速,其中双馈风电机 组 DFIG(Doubly-Fed Induction Generator)在国内应 用最为广泛。随着风电并网容量的增加,系统发生短 路时 DFIG 输出的短路电流对电网保护的影响受到 越来越多的关注[1-4]。等值电路是短路计算和保护分 析的基础工具,建立可用于风电接入系统保护分析、 整定和配置的 DFIG 等值电路具有重要意义。

当前 DFIG 普遍采用转子侧加装撬棒保护的方 法抑制转子侧过流,从而实现低电压穿越。经过近 十年的研究,基于撬棒保护的 DFIG 单机短路特性已 为人熟知。撬棒保护动作后,DFIG 短路电流中包含 工频分量、衰减转频分量和衰减直流分量[5-6]。诸多 文献研究了 DFIG 短路电流的计算方法[7-10],只需知 道发生故障时 DFIG 机端电压的跌落程度,利用文 献中提出的解析表达式即可准确地计算短路电流的 各频率成分。但这些方法只能用于计算 DFIG 单机 出口的短路电流,无法求解 DFIG 接入系统后的短 路电流分布。

从继电保护的角度出发,关注更多的是故障后系 统网络中短路电流、电压的分布情况。序网等值电路 分析法是获取系统各处短路特性、进行保护分析和 整定的有效手段。然而,现有的针对 DFIG 接入电网 后线路保护的研究中,并未建立准确有效的 DFIG 等 值电路模型。文献[11-12]将投撬棒后的 DFIG 用传 统异步电机的序阻抗来等效,缺点是无法反映故障 初期 DFIG 提供的转频电流。文献[13-14]将 DFIG

收稿日期:2017-04-12;修回日期:2017-11-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277143)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277143)

等值为暂态电势和暂态电抗的串联,其中暂态电势 正比于转子磁链,但由于文中近似忽略了转子磁链 中的故障稳态分量,导致该等值方案不能准确描述 短路电流的工频分量。文献[15]分别给出了工频、转 频分量对应的 DFIG 等值电路,但其中的转频分量等 值电路完全独立于 DFIG 的外部电路,无法用于分析 计算转频电流在系统网络中的分布。综上,对于撬棒 投入后的 DFIG 接入系统,目前尚未有能够同时准确 地计算网络中短路电流工频分量和转频分量分布的 方法。

针对上述问题,本文提出了一种可用于风电接入 系统短路电流分布计算的 DFIG 序网等值电路。考虑 到撬棒保护动作后 DFIG 的短路特性取决于电机的 电磁暂态过程,故本文首先以 DFIG 磁链为研究对象, 通过求解其状态微分方程得到磁链的组成成分及其 解析表达式;在此基础上,将 DFIG 电压空间矢量方 程按各频率成分进行分解,并根据空间矢量与相量 间的关系,形成 DFIG 转频序网等值电路和工频序网 等值电路;然后以某 DFIG 接入系统为例,利用本文 提出的 DFIG 等值电路计算网络中各处短路电流,并 进行仿真验证。

撬棒保护动作后 DFIG 磁链特性分析 1

当电网发生故障导致 DFIG 机端电压跌落严重 时,转子侧撬棒保护将在故障发生约 2~5 ms 后快速 投入,同时闭锁转子侧变流器。可不考虑撬棒保护动 作延时,近似认为故障发生瞬间撬棒电路投入。

撬棒保护动作后,采用电动机惯例,参考文献[16] 可写出定子静止坐标系下的 DFIG 空间矢量数学模 型,如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix}
\boldsymbol{U}_{s}^{s} = \boldsymbol{R}_{s}\boldsymbol{I}_{s}^{s} + \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_{s}^{s}}{\mathrm{d}t} \\
\boldsymbol{0} = \boldsymbol{R}_{r}^{\prime}\boldsymbol{I}_{r}^{s} + \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_{r}^{s}}{\mathrm{d}t} - \mathrm{j}\boldsymbol{\omega}_{r}\boldsymbol{\psi}_{r}^{s} \\
\boldsymbol{\psi}_{s}^{s} = \boldsymbol{L}_{s}\boldsymbol{I}_{s}^{s} + \boldsymbol{L}_{m}\boldsymbol{I}_{r}^{s}, \quad \boldsymbol{\psi}_{r}^{s} = \boldsymbol{L}_{m}\boldsymbol{I}_{s}^{s} + \boldsymbol{L}_{r}\boldsymbol{I}_{r}^{s}
\end{bmatrix}$$
(1)

其中,U、I、 ψ 分别为电压、电流、磁链,其下标 s 和 r 分别表示定子量和转子量,上标 s 表示定子静止坐标 系下的空间矢量; R'_r 为转子电阻与撬棒电阻之和; R_s 为定子电阻; L_m 为定转子间等效互感; L_s 、 L_r 分别为 定子、转子绕组等效自感; ω_r 为转子转速角频率。

通常在风电接入系统中,风机容量与其接入点的 短路容量之比较小,因此发生故障后 DFIG 机端电 压主要由稳定的电网电压支撑,电压暂态分量很小。 若近似忽略该电压暂态分量,则电网发生不对称短 路故障时,取故障发生时刻为 *t*=0 时刻,DFIG 定子 电压的空间矢量可表示为:

$$\boldsymbol{U}_{s}^{s} = \boldsymbol{U}_{s1}^{s} + \boldsymbol{U}_{s2}^{s} = \boldsymbol{U}_{s1} e^{j\omega_{s}t} + \hat{\boldsymbol{U}}_{s2} e^{-j\omega_{s}t}$$
(2)

其中, U_{s1}^{s} 、 U_{s2}^{s} 分别为定子电压正、负序分量的空间矢量; U_{s1} 为电压正序相量; \hat{U}_{s2} 为电压负序相量 U_{s2} 的 共轭; ω_{s} 为同步速角频率。需要说明的是,为了区分 空间矢量和相量,本文中空间矢量均加上标 s,相量 不加上标。

将式(1)整理为以磁链为状态变量的微分方程 组,如式(3)所示。

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{s}} \\ \boldsymbol{\psi}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{\mathrm{s}}}{L_{\mathrm{s}}'} & \frac{R_{\mathrm{s}}L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{s}}'L_{\mathrm{r}}} \\ \frac{R_{\mathrm{r}}'L_{\mathrm{m}}}{L_{\mathrm{r}}'L_{\mathrm{s}}} & -\frac{R_{\mathrm{r}}'}{L_{\mathrm{r}}'} + j\omega_{\mathrm{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{s}} \\ \boldsymbol{\psi}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{\mathrm{s}}^{\mathrm{s}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$
$$L_{\mathrm{s}}' = L_{\mathrm{s}} - \frac{L_{\mathrm{m}}^{2}}{L_{\mathrm{r}}}, \quad L_{\mathrm{r}}' = L_{\mathrm{r}} - \frac{L_{\mathrm{m}}^{2}}{L_{\mathrm{s}}}$$

将式(2)代入式(3),求解即可得投撬棒后 DFIG 的定转子磁链。由于方程式(3)为 $\frac{d\vec{x}}{dt} = A\vec{x} + \vec{u}$ 的形 式,其全解为强制解和齐次解之和。若将系数矩阵A 的特征值记为 $\lambda_1, \lambda_2,$ 对应的特征向量记为 $\vec{r}_1 = \begin{bmatrix} r_1 \\ 1 \end{bmatrix}$ 、

其中,下标f表示工频分量;强制解系数 ψ_{s1} 、 $\hat{\psi}_{s2}$ 、 ψ_{d1} 、 $\hat{\psi}_{d2}$ 可通过将式(2)代入式(3)求得;齐次解系数 c_1 、 c_2 可根据故障前后磁链不突变求得,具体计算式 见式(5)。

ſ

$$\begin{vmatrix} c_{1} = \frac{(\psi_{s[0]} - \psi_{sf1} - \hat{\psi}_{sf2}) - r_{2}(\psi_{r[0]} - \psi_{rf1} - \hat{\psi}_{rf2})}{r_{1} - r_{2}} \\ c_{2} = \frac{r_{1}(\psi_{r[0]} - \psi_{rf1} - \hat{\psi}_{rf2}) - (\psi_{s[0]} - \psi_{sf1} - \hat{\psi}_{sf2})}{r_{1} - r_{2}} \end{cases}$$
(5)

其中, $\boldsymbol{\psi}_{s[0]}$ 、 $\boldsymbol{\psi}_{r[0]}$ 分别为定子、转子磁链在故障前一瞬间的初值。

由式(4)可知,投撬棒后 DFIG 的定转子磁链包 含4种成分。式(4)2个等式等号右边的前2项为幅 值稳定的工频正、负序分量,后2项的频率特性及衰 减情况取决于由 DFIG 电机参数和转速决定的系数 矩阵 A 的特征值。

以某 DFIG 为例(DFIG 的参数如下:额定容量为 1.632 MV·A,额定电压为 690 V,额定频率为 50 Hz, 转动惯量时间常数为 1.5 s,定转子匝数比为 0.3663, 定子电阻为 0.009 08 p.u.,定子漏感为 0.181 67 p.u., 转子电阻为 0.009 02 p.u.,转子漏感为 0.143 97 p.u., 励磁电感为 5.8959 p.u.,撬棒电阻为 0.015 p.u.,上述 所有阻抗为以 DFIG 自身额定值作为基准的标幺 值),将其电机参数及故障前一瞬间的转速 1.2 p.u. 代入系数矩阵 A 中,可求得其特征值为:

$$\begin{cases} \lambda_1 = -20.378 + j2 \pi \times 59.914 \\ \lambda_2 = -8.805 + j2 \pi \times 0.085 \end{cases}$$
(6)

其中,特征值的虚部表征对应的磁链成分的频率。因此,式(4)中 $c_1r_1e^{\lambda_t}$ 、 $c_1e^{\lambda_t}$ 为幅值按指数形式衰减、频率与电机转速对应($1.2 \times 50 = 60$ Hz)的衰减转频 分量; $c_2r_2e^{\lambda_2}$ 、 $c_2e^{\lambda_2}$ 为频率很低的低频成分,可近似看 作衰减直流分量。

综上, 撬棒保护动作后, DFIG 磁链在定子静止 坐标系下表现为稳定的工频正负序分量、衰减转频 分量以及衰减直流分量之和, 可记作:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\psi}_{s}^{s}(t) = \boldsymbol{\psi}_{sf1}^{s} + \boldsymbol{\psi}_{sf2}^{s} + \boldsymbol{\psi}_{st}^{s} + \boldsymbol{\psi}_{sdc}^{s} \\ \boldsymbol{\psi}_{r}^{s}(t) = \boldsymbol{\psi}_{rf1}^{s} + \boldsymbol{\psi}_{rf2}^{s} + \boldsymbol{\psi}_{rt}^{s} + \boldsymbol{\psi}_{rdc}^{s} \\ \begin{cases} \boldsymbol{\psi}_{st}^{s} \approx \boldsymbol{c}_{1} \boldsymbol{r}_{1} \mathrm{e}^{-t/T_{r}} \mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_{t}}, \quad \boldsymbol{\psi}_{sdc}^{s} \approx \boldsymbol{c}_{2} \boldsymbol{r}_{2} \mathrm{e}^{-t/T_{dc}} \\ \boldsymbol{\psi}_{r}^{s} \approx \boldsymbol{c}_{1} \mathrm{e}^{-t/T_{r}} \mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega_{t}}, \quad \boldsymbol{\psi}_{rdc}^{s} \approx \boldsymbol{c}_{2} \mathrm{e}^{-t/T_{dc}} \end{cases} \end{cases}$$

$$(7)$$

其中,下标 t 表示转频分量;下标 dc 表示直流分量; T', T', 分别为转频分量、直流分量的衰减时间常数。

2 撬棒保护动作后 DFIG 序网等值电路

2.1 DFIG 转频序网等值电路

从故障后电机内部物理过程来看,DFIG 转频电 量的产生机理和变化规律可类比于同步电机。发生 故障后 DFIG 机端电压跌落,引起 DFIG 定转子磁链 发生变化,为了维持磁链不突变,转子绕组中感生出 自由直流分量,进而产生以 ω_r顺转子旋转方向旋转 的气隙磁场。该磁场在定子绕组中产生转频正序电 势,转频负序电势为 0。

DFIG 接入系统后,当电网发生不对称短路故障时,故障点处电压、电流的转频分量必然满足故障边界条件,因此系统各处的电压和电流均存在转频正序、负序分量。尽管 DFIG 的转频负序电势为 0,但其机端电压、定子电流均含有转频负序分量。

结合上述物理过程分析,下文将基于第1节的 磁链解析结果推导 DFIG 的转频正、负序等值电路。

由于 DFIG 电机参数满足 1/T'_r ≪ω_r,故由式(8) 可知 DFIG 磁链转频分量的微分可近似表示为:

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{st}}^{\mathrm{s}}}{\mathrm{d}t} = \left(-\frac{1}{T_{\mathrm{r}}'} + j\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{r}}\right)\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{st}}^{\mathrm{s}} \approx j\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{r}}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{st}}^{\mathrm{s}}
\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{rt}}^{\mathrm{s}}}{\mathrm{d}t} = \left(-\frac{1}{T_{\mathrm{r}}'} + j\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{r}}\right)\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{rt}}^{\mathrm{s}} \approx j\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{r}}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{rt}}^{\mathrm{s}}$$
(9)

将式(9)代入定子电压方程式(1),并用转子磁 链和定子电流表示定子磁链,可得定子电压转频正、 负序空间矢量满足的表达式,如式(10)所示。

$$\begin{vmatrix} \boldsymbol{U}_{st1}^{s} = (\boldsymbol{R}_{s} + j\boldsymbol{\omega}_{r}\boldsymbol{L}_{s}')\boldsymbol{I}_{st1}^{s} + j\boldsymbol{\omega}_{r}\frac{\boldsymbol{L}_{m}}{\boldsymbol{L}_{r}}\boldsymbol{\psi}_{rt}^{s} \\ \boldsymbol{U}_{st2}^{s} = (\boldsymbol{R}_{s} - j\boldsymbol{\omega}_{r}\boldsymbol{L}_{s}')\boldsymbol{I}_{st2}^{s} \end{cases}$$
(10)

将式(10)变换为相量满足的表达式,整理可得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{st1} = \frac{\mathbf{U}_{st1} - j\omega_{r} \frac{L_{m}}{L_{r}} \boldsymbol{\psi}_{rt}}{R_{s} + j\omega_{r}L_{s}'} \\ \mathbf{I}_{st2} = \frac{\mathbf{U}_{st2}}{R_{s} + j\omega_{r}L_{s}'} \end{bmatrix}$$
(11)

其中, **I**_{s1}、**I**_{s2}分别为定子电流转频正序、负序相量; **U**_{s1}、**U**_{s2}分别为定子电压转频正序、负序相量。

由式(11)可知,投撬棒后 DFIG 的转频正序等 值电路可等效为带内阻抗的电势,转频负序等值电 路为无源阻抗。据此可作出如图1所示的等值电路。



图 1 投撬棒后 DFIG 转频序网等值电路

Fig.1 Rotor speed frequency equivalent sequence circuit of DFIG with Crowbar protection

图 1 中等值的转频正序电势 *E*_{st}、转频正序阻抗 *Z*_t、转频负序阻抗 *Z*_o按式(12)计算。

$$\begin{cases} \boldsymbol{E}_{st} = j\omega_{r} \frac{L_{m}}{L_{r}} \boldsymbol{\psi}_{rt} \approx j\omega_{r} \frac{L_{m}}{L_{r}} \boldsymbol{c}_{1} e^{-t/T_{r}'} \\ Z_{t1} = Z_{t2} = R_{s} + j\omega_{r} L_{s}' \end{cases}$$
(12)

由式(12)可见,转频正序电势的幅值以时间常数 T',按指数形式衰减,其初始幅值、相位取决于 DFIG 故障前的出力和转速(与风速有关)以及故障 后机端电压的跌落程度;转频正序阻抗与负序阻抗 相等。

图 1 表明,转频正序等值电路有源,因此故障后 投入撬棒的 DFIG 始终发出转频正序有功功率;而 转频负序等值电路无源,且负序阻抗中的电阻成分 始终为正,因此 DFIG 始终吸收转频负序有功功率。

2.2 DFIG 工频序网等值电路

关于 DFIG 工频序网等值电路, 文献 [15] 已有

解析推导,其采用的方法是首先求解 DFIG 数学模型得到短路电流,然后由短路电流的解析表达式反推等值电路。而本文旨在利用等值电路求解短路电流,故此处给出另外一种推导思路。根据定转子磁链工频分量的变化特性,直接对 DFIG 数学模型进行等效简化,推导 DFIG 工频序网等值电路。

由式(4)可知,投撬棒后 DFIG 磁链工频分量的 微分为:

$$\left| \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{sf}}^{\mathrm{s}}}{\mathrm{d}t} = j\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{sf1}}^{\mathrm{s}} - j\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{sf2}}^{\mathrm{s}} \\ \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{rf}}^{\mathrm{s}}}{\mathrm{d}t} = j\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{rf1}}^{\mathrm{s}} - j\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{s}}\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{rf2}}^{\mathrm{s}} \right|$$
(13)

将式(13)代入电压平衡方程式(1),并结合磁链 方程,整理可得工频正负序空间矢量满足的定子、转 子电压方程为:

$$\begin{cases} U_{sf1}^{s} = R_{s}I_{sf1}^{s} + j\omega_{s}L_{s}I_{sf1}^{s} + j\omega_{s}L_{m}I_{rf1}^{s} \\ 0 = R_{r}'I_{rf1} + js\omega_{s}L_{r}I_{rf1}^{s} + js\omega_{s}L_{m}I_{sf1}^{s} \\ U_{sf2}^{s} = R_{s}I_{sf2}^{s} - j\omega_{s}L_{s}I_{sf2}^{s} - j\omega_{s}L_{m}I_{rf2}^{s} \\ 0 = R_{r}'I_{rf2}^{s} - j(2-s)\omega_{s}L_{r}I_{rf2}^{s} - j(2-s)\omega_{s}L_{m}I_{sf2}^{s} \end{cases}$$
(14)

其中, $s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$ 为电机滑差。

根据空间矢量与相量间的关系^[9],将式(14)变换为正、负序相量满足的方程,如式(15)所示。

$$\begin{cases} \boldsymbol{U}_{sf1} = \boldsymbol{R}_{s}\boldsymbol{I}_{sf1} + j\boldsymbol{\omega}_{s}\boldsymbol{L}_{s}\boldsymbol{I}_{sf1} + j\boldsymbol{\omega}_{s}\boldsymbol{L}_{m}\boldsymbol{I}_{rf1} \\ 0 = \frac{\boldsymbol{R}'_{r}}{s}\boldsymbol{I}_{rf1} + j\boldsymbol{\omega}_{s}\boldsymbol{L}_{r}\boldsymbol{I}_{rf1} + j\boldsymbol{\omega}_{s}\boldsymbol{L}_{m}\boldsymbol{I}_{sf1} \\ \boldsymbol{U}_{sf2} = \boldsymbol{R}_{s}\boldsymbol{I}_{sf2} + j\boldsymbol{\omega}_{s}\boldsymbol{L}_{s}\boldsymbol{I}_{sf2} + j\boldsymbol{\omega}_{s}\boldsymbol{L}_{m}\boldsymbol{I}_{rf2} \\ 0 = \frac{\boldsymbol{R}'_{r}}{2-s}\boldsymbol{I}_{rf2} + j\boldsymbol{\omega}_{s}\boldsymbol{L}_{r}\boldsymbol{I}_{rf2} + j\boldsymbol{\omega}_{s}\boldsymbol{L}_{m}\boldsymbol{I}_{sf2} \end{cases}$$
(15)

根据式(15)可作出投撬棒后 DFIG 的工频序网 等值电路,如图 2 所示,该电路与普通异步电机的正 负序等值电路相同,为无源阻抗。



图 2 投撬棒后 DFIG 工频序网等值电路

Fig.2 Power frequency equivalent sequence circuit of DFIG with Crowbar protection

图 2 中等值的正序阻抗 Z_n 与负序阻抗 Z₂ 的表 达式如下:

$$\begin{cases} Z_{f1} = R_s + j\omega_s L_{s\sigma} + \frac{(R'_r/s + j\omega_s L_{r\sigma})j\omega_s L_m}{R'_r/s + j\omega_s L_r} \\ Z_{f2} = R_s + j\omega_s L_{s\sigma} + \frac{[R'_r/(2-s) + j\omega_s L_{r\sigma}]j\omega_s L_m}{R'_r/(2-s) + j\omega_s L_r} \end{cases}$$
(16)

其中, $L_{s\sigma}=L_{s}-L_{m}$ 、 $L_{r\sigma}=L_{r}-L_{m}$ 分别为定子、转子绕组漏感。

式(16)表明,投撬棒后 DFIG 的工频正、负序阻抗与其电机参数、滑差 s 以及撬棒阻值有关,且正、负序阻抗不相等。同时可以看出,当 DFIG 的滑差

在-0.3~0.3 范围内变化时,负序阻抗中的电阻成分 始终为正,表明故障后 DFIG 始终吸收负序有功功 率;而正序阻抗中电阻成分的正负与滑差的正负有 关。当滑差 s<0时,正序电阻为负,表明 DFIG 发出 工频正序有功功率;当滑差 s≥0时,正序电阻为正, 表明 DFIG 吸收工频正序有功功率。

3 DFIG 接入系统的短路计算方法

将第2节提出的 DFIG 序网等值电路与风电接 入系统中其他元件的序网等值电路互联,利用复合 序网分析方法即可进行故障分析和短路计算。此处 以图3所示的 DFIG 接入系统^[17]为例,说明详细的 计算步骤。



图 3 DFIG 接入系统示意图 Fig.3 Schematic diagram of system integrated with DFIG

图 3 中, E_g 为变电站等值电源; Z_g 为等值阻抗; Z_{L1} 、 Z_{L2} 分别为线路 L₁、L₂的阻抗。在已知 DFIG 的铭 牌参数、撬棒阻值、转子转速 ω_r 以及机端电压故障 前初值 $U_{s[0]}$ 和定子电流故障前初值 $I_{s[0]}$ 的基础上, 以母线 3 处发生 BC 两相相间短路故障为例,说明 短路电流的计算步骤,具体如下。

a.将 DFIG 的铭牌参数、撬棒阻值和电机滑差 代入式(16),计算 DFIG 工频等值正序阻抗 Z_{f1}、负序 阻抗 Z_{f2}。考虑到兆瓦级风电机组转动惯量较大,且 继电保护关注的暂态过程时间很短,故可近似认为 故障期间 DFIG 转速保持不变^[18],式(16)中的滑差 *s* 可取故障前一瞬间的值。

b. 形成风电接入系统的工频序网等值电路,并 根据故障类型绘制复合序网。BC 相间短路对应的 故障边界条件为正、负序网在故障点处并联,据此可 画出如图 4 所示的复合序网。求解该电路,可得各 母线电压及各支路电流的工频分量。



Fig.4 Power frequency compound sequence network of system

c. 计算 DFIG 定、转子磁链在故障前一瞬间的 初值以及故障后稳定工频分量的值。 由已知的 DFIG 机端电压 $U_{s[0]}$ 及电流初值 $I_{s[0]}$ 可求出定、转子磁链故障前初值 $\psi_{s[0]}$ 和 $\psi_{r[0]}$ 。

利用步骤 b 得到的 DFIG 定子电流工频正序分量 I_{s11} 、负序分量 I_{s12} 求出对应的转子电流工频正序 分量 I_{r11} 、负序分量 I_{r120} 然后由定、转子电流工频分量 可求得定子磁链的工频正序分量 ψ_{s11} 、负序分量 ψ_{s12} 和转子磁链的正序分量 ψ_{r10} 、负序分量 ψ_{r10} 。

d. 将步骤 **c** 中求得的 DFIG 磁链初值和故障稳态工频分量的值代入式(5)中求出 c_{10} 再将 c_{1} 和 DFIG 电机参数代入式(12),可得 DFIG 的转频电势 E_{st} 与转频等值正序阻抗 Z_{11} 负序阻抗 Z_{20} 。

e. 形成 DFIG 接入系统的转频序网等值电路, 并根据故障类型绘制复合序网。发生 BC 相间短路时,正、负序网在故障点处并联,复合序网如图 5 所示。求解该电路,可得各母线电压及各支路电流的转频分量。



图 5 系统的转频复合序网 Fig.5 Rotor speed frequency compound sequence network of system

图 5 中,各阻抗的下标 t 表示该元件的转频等 值阻抗。转频电流流经电网中任一电感 L 时,对应 的等值感抗为 $(-1/T'_r+j\omega_r)L\approx j\omega_r L$,因此,若线路、 变压器等元件的工频阻抗为 Z=R+jX,则其转频阻 抗为 $Z_t=R+j\omega_r X/\omega_s$ 。据此可得图 5 所示转频复合 序网中各元件的转频阻抗参数。

f. DFIG 接入系统中流过各支路的短路交流电 流即为其工频分量与转频分量之和。

综上所述,基于本文所提出的投撬棒后 DFIG 序网等值电路,只需已知 DFIG 的铭牌参数、故障初 值条件(故障发生前一瞬间的电机转速和机端电压 电流)、故障位置及类型,即可计算出 DFIG 接入系 统中各处短路电流工频分量的幅值和相位以及转 频分量的幅值、相位和衰减时间常数。

4 仿真验证

为了验证第3节所提出的短路计算方法的有效 性,在PSCAD 仿真平台中搭建了如图3所示的系统 模型,对比了不同故障条件下短路电流的仿真与计 算结果。

仿真系统参数如下:图 3 中变电站的额定电压为 0.69 kV,短路容量为 100 MV·A;线路 L₁、L₂ 阻抗分别 为 Z_{L1} =0.0107+j0.0536 $\Omega_{\chi}Z_{L2}$ =0.0050+j0.0250 Ω_{σ} DFIG 的参数同第 1 节。

22

仿真中,故障前 DFIG 运行在转速为 0.7~1.3 p.u. 的工况下,故障发生后瞬间投入撬棒保护,同时闭锁 网侧变流器,故障持续 0.3 s。

为了充分验证本文计算方法的有效性,针对 DFIG 故障前运行在不同转速状态下和故障点处发 生三相金属性短路、A 相接地短路、BC 相间短路、BC 两相接地短路的情形,对比短路电流的计算与仿真 结果。限于篇幅,本文只给出了故障前 DFIG 转速为 1.2 p.u.,母线 3 处发生 BC 相间短路和故障前 DFIG 转速为 0.8 p.u. 母线 3 处发生三相金属性短路 2 种 情形下的短路电流波形对比结果。

图 6 为上述 2 种情形下流过线路 L 的 B 相短 路电流计算波形与仿真波形的对比。其中,计算波形 是根据计算的短路电流工频分量与转频分量相加得 到的;仿真波形滤除了衰减直流分量。可以看到,2



图 6 流过线路 L, 的 B 相短路电流仿真与计算波形 Fig.6 Simulative and calculative waveforms of phase-B short circuit current in L₂

种短路情形下的计算波形与仿真波形基本吻合,验 证了本文所提计算方法的有效性。

为了进一步验证本文方法的准确性,针对流过 线路 L、L。的短路电流以及 DFIG 定子短路电流,用 最小二乘拟合法从仿真波形中提取其各交流频率成 分的幅值、相位,并与计算结果进行对比。表1为 DFIG 转速为 1.2 p.u.、母线 3 处发生不同短路故障 类型时的短路电流对比结果,表2为不同转速下母 线 3 处发生 BC 相间短路故障时的短路电流对比结 果(表2中转速为标幺值)。

由表 1、2 可见, DFIG 接入系统中各处短路电流 的计算值与仿真值基本一致,工频分量与转频分量 的幅值计算误差在4%以内.相位计算误差小于5°。 对于继电保护整定计算而言,上述误差均在可接受 范围内,从而验证了本文方法在不同 DFIG 转速、不 同短路故障下的准确性。

以故障前 DFIG 转速为 1.2 p.u. 和 0.8 p.u.、母线 3 处发生 BC 相间短路故障这 2 种情形为例,分析故 障后 DFIG 发出的有功功率。提取以上 2 种故障情 形下 DFIG 机端电压仿真结果中的工频和转频分 量,结合上述 DFIG 定子电流的仿真结果,分析故障 后 DFIG 发出的有功功率。结果表明:转速为 1.2 p.u. 的故障情形下,DFIG发出工频正序有功 0.211 MW、发 出转频正序有功 0.083 MW、吸收工频负序有功 0.008 MW、吸收转频负序有功 0.002 MW:转速为 0.8 p.u. 的故障情形下, DFIG 吸收工频正序有功 0.238 MW、 发出转频正序有功 0.080 MW、吸收工频负序有功 0.009 MW、吸收转频负序有功 0.0003 MW。可见,故 障后 DFIG 吸收工频和转频负序有功、发出转频正 序有功,滑差小于0时发出工频正序有功,滑差大于

	non chcun						
短路故障 类型	电流分量	线路 L ₁ 电流/kA		线路 L ₂ 电流/kA		DFIG 定于电流 / kA	
		仿具值	计算值	仿具值	计算值	仿具值	计算值
A 相接地	工频正序	4.581∠-180.3°	$4.590 \angle -179.2^{\circ}$	$1.737 lap{-161.6^{\circ}}$	1.732∠-161.1°	$2.985 \angle 169.1^{\circ}$	2.993∠170.5°
	工频负序	1.067∠-159.4°	$1.065 \angle -158.4^{\circ}$	$1.737 lap{-}-161.6^{\circ}$	$1.732 \angle -161.1^{\circ}$	$0.672 \angle 14.4^{\circ}$	$0.671 \angle 14.7^{\circ}$
	工频零序	1.738∠-161.8°	1.732∠-161.1°	$1.737 \angle -161.6^{\circ}$	1.732∠-161.1°	0	0
	转频正序	$3.017 \angle 8.0^{\circ}$	$3.006 \angle 7.2^{\circ}$	$1.022 \angle -171.3^{\circ}$	$1.035 \angle -173.1^{\circ}$	$4.072 \angle 7.9^{\circ}$	4.041∠7.1°
	转频负序	0.657∠-171.1°	$0.637 \angle -170.2^{\circ}$	$1.022 \angle -171.3^{\circ}$	1.035∠-173.1°	$0.399 \angle 5.2^{\circ}$	$0.400 \angle 2.4^{\circ}$
	转频零序	$1.058 \angle -172.4^{\circ}$	$1.035 \angle -173.1^{\circ}$	$1.022 \angle -171.3^{\circ}$	$1.035 \angle -173.1^{\circ}$	0	0
BC 相间	工频正序	5.30∠-176.7°	5.29∠-175.7°	2.90∠-163.2°	2.90∠-162.6°	$2.57 \angle 168.0^{\circ}$	2.55∠169.3°
	工频负序	1.78∠19.2°	$1.78 \angle 20.0^{\circ}$	$2.88 \angle 16.8^{\circ}$	2.90∠17.4°	1.12∠-167.1°	1.12∠−166.9°
	转频正序	2.60∠7.5°	$2.59 \angle 8.8^{\circ}$	$1.75 \angle -173.0^{\circ}$	$1.76 \angle -172.0^{\circ}$	4.36∠7.4°	4.35∠8.5°
	转频负序	1.09∠9.3°	$1.08 \angle 10.9^{\circ}$	$1.75 \angle 7.1^{\circ}$	$1.76 \angle 8.0^{\circ}$	$0.68 \angle -175.8^{\circ}$	$0.68 \angle -176.5^{\circ}$
BC 两相 接地	工频正序	5.751∠-174.9°	5.749∠-173.9°	$3.665 \angle -163.8^{\circ}$	3.667∠-163.1°	$2.265 \angle 167.0^{\circ}$	2.255∠168.3°
	工频负序	$1.304 \angle 18.1^{\circ}$	$1.303 \angle 19.0^{\circ}$	2.118∠15.7°	$2.120 \angle 16.3^{\circ}$	$0.819 \angle -168.2^{\circ}$	0.821∠-167.9°
	工频零序	$1.548 \angle 17.0^{\circ}$	$1.548 \angle 17.8^{\circ}$	$1.548 \angle 17.0^{\circ}$	$1.548 \angle 17.8^{\circ}$	0	0
	转频正序	2.286∠8.1°	2.307∠9.1°	$2.200 \angle -171.8^{\circ}$	2.233∠-171.0°	$4.517 \angle 8.1^{\circ}$	4.540∠9.1°
	转频负序	0.800∠10.3°	0.794∠11.2°	1.269∠7.1°	1.291∠8.4°	$0.486 \angle -175.5^{\circ}$	0.499∠-176.2°
	转频零序	0.945∠8.5°	0.943∠9.9°	0.932∠9.7°	0.943∠9.9°	0	0
ABC 三相 短路	工频正序	7.053∠-171.9°	7.041∠-170.9°	5.712∠-165.7°	5.729∠-165.0°	1.499∠164.4°	1.466∠165.5°
	转频正序	1.529∠7.3°	1.531∠10.0°	3.510∠-171.7°	3.564∠-169.3°	5.141∠7.3°	5.094∠10.5°

Table 2 Short circuit currents with phase-B-to-C short circuit fault at Bus 3 and different rotor speeds of DFIG										
转速	由达八旦	线路 L ₁ 电流/kA		线路L2电流/kA		DFIG 定子电流/kA				
	电弧力重	仿真值	计算值	仿真值	计算值	仿真值	计算值			
0.8	工频正序	5.291∠-168.1°	5.294∠-167.5°	$2.858 \angle -174.0^{\circ}$	2.857∠-172.7°	$2.467 lap{-161.2^{\circ}}$	$2.462 \angle -161.5^{\circ}$			
	工频负序	$1.759 \angle 8.4^{\circ}$	$1.756 \angle 9.8^{\circ}$	$2.858 \angle 6.0^{\circ}$	2.857∠7.3°	$1.103 \angle -177.9^{\circ}$	$1.106 \angle -176.7^{\circ}$			
	转频正序	$2.579{\scriptstyle \angle}19.8^\circ$	$2.607 \angle 17.2^{\circ}$	$1.767 \angle -161.0^{\circ}$	1.770∠-163.9°	$4.369 \angle 19.6^{\circ}$	$4.376 \angle 16.8^{\circ}$			
	转频负序	$1.092 \angle 23.2^{\circ}$	$1.086 \angle 20.4^{\circ}$	$1.766 \angle 19.0^{\circ}$	$1.770 \angle 16.1^{\circ}$	$0.677 \angle -166.5^{\circ}$	$0.691 \angle -170.5^{\circ}$			
0.9	工频正序	5.090∠-164.9°	5.091∠-164.7°	3.026∠-177.5°	3.017∠-175.7°	2.253∠-147.7°	$2.206 \angle -149.6^{\circ}$			
	工频负序	$1.859 \angle 5.1^{\circ}$	$1.854 \angle 6.8^{\circ}$	$3.026 \angle 2.5^{\circ}$	3.017∠4.3°	$1.157 \angle -181.6^{\circ}$	$1.167 \angle -179.8^{\circ}$			
	转频正序	$2.425{\scriptstyle{\textstyle \angle}}24.4^\circ$	2.471∠25.1°	$1.630 \angle -166.0^{\circ}$	$1.677 \angle -155.9^{\circ}$	4.114∠24.7°	4.147∠24.7°			
	转频负序	$1.029 {\scriptstyle \angle} 26.4^\circ$	$1.030 \angle 27.9^{\circ}$	$1.630 \angle 24.1^{\circ}$	$1.677 \angle 24.1^{\circ}$	$0.656 \angle -159.3^{\circ}$	$0.652 simes -161.8^{\circ}$			
1.1	工频正序	5.062∠-180.1°	$5.054 \angle -178.7^{\circ}$	$3.106 \angle -160.5^{\circ}$	3.106∠-160.1°	$2.374 \angle 154.2^{\circ}$	2.331∠156.2°			
	工频负序	$1.897 \angle 21.8^{\circ}$	$1.909 \angle 22.5^{\circ}$	$3.106 \angle 19.5^{\circ}$	$3.106 \angle 19.9^{\circ}$	$1.207 \angle -164.5^{\circ}$	$1.202 \angle -164.3^{\circ}$			
	转频正序	$2.355 sim 0.6^\circ$	$2.349 \angle 0.3^{\circ}$	$1.588 \angle 180.3^{\circ}$	$1.594 \angle 179.5^{\circ}$	$3.968 \angle 0.8^{\circ}$	3.943∠-0.1°			
	转频负序	1.018∠4.3°	$0.981 \angle 2.6^{\circ}$	$1.588 \angle 0.3^{\circ}$	$1.594 \angle -0.5^{\circ}$	$0.598 \angle 176.2^{\circ}$	$0.617 \angle 174.6^{\circ}$			

表 2 不同转速下母线 3 处发生 BC 相间短路故障时的短路电流

0时吸收工频正序有功,该结论与第2节的分析结果 一致。

此外,由表1、2中线路L,L,短路电流的组成成 分可以看出,转频分量所占比例较大。由图6所示波 形也可直观看出,较大的转频电流将导致故障初期 的电流幅值明显大于故障稳态的电流幅值。因此,对 DFIG 接入系统中的线路进行保护整定计算时,不能 简单地将 DFIG 视作异步电机而忽略线路中流过的 短路电流转频分量,否则将造成整定值偏小,电流保 护存在超范围动作的可能。本文提出的短路计算方 法同时考虑了工频分量和转频分量,得到的短路电 流分布特性更加真实准确,因此有助于含 DFIG 接入 系统的电流保护分析和整定计算。

5 结论

本文提出了一种撬棒保护动作后 DFIG 的序网 等值电路,并基于该等值电路给出了 DFIG 接入系 统的短路计算方法,所得结论如下。

a. 投撬棒后 DFIG 的工频序网等值电路与异步 电机的等值电路相同,为无源阻抗。DFIG 的电机滑差 及撬棒阻值是影响工频等值电路参数的主要因素。

b. 投撬棒后 DFIG 的转频序网等值电路与同步 电机类似,其正序等值电路为带内阻抗的电势,负序 等值电路为无源阻抗。电网发生故障前 DFIG 的出力 和转速、故障后 DFIG 机端电压跌落程度以及撬棒 阻值是影响转频等值电路参数的主要因素。

c. 利用提出的 DFIG 序网等值电路,只需已知 DFIG 的铭牌参数和故障初值条件,即可准确计算各 种故障情形下含 DFIG 系统的短路电流分布。

d. DFIG 接入系统在某些故障情况下,短路电流 中的转频分量所占比例较大,不能忽略。对 DFIG 接 人系统进行电流保护整定时,应该计及短路电流转 频分量,以避免保护误动。

本文所提出的 DFIG 接入系统短路计算方法避

免了仿真平台的大量缓慢计算,有利于现场保护的 整定工作:所提出的等值电路对 DFIG 接入系统的 保护分析和配置有一定的理论指导意义。

参考文献:

- [1] 苏常胜,李凤婷,武宇平. 双馈风电机组短路特性及对保护整定 的影响[J]. 电力系统自动化,2011,35(6):86-91. SU Changsheng, LI Fengting, WU Yuping. An analysis on shortcircuit characteristic of wind turbine driven doubly fed induction generator and its impact on relay setting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 86-91.
- [2] 童宁,林湘宁,李正天,等. 对称电压跌落条件下双馈风电机群馈 出电流与线路电流保护的交互影响[J]. 中国电机工程学报,2014,34 $(22) \cdot 3806 - 3814.$

TONG Ning, LIN Xiangning, LI Zhengtian, et al. Study for reciprocal effect between overcurrent protection and doubly-fed induction generator feeding current under the condition of symmetrical voltage sag[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3806-3814.

- [3] 陈琳浩,张金华,都劲松,等.采用电压极化的比相式距离保护用 于双馈式风电场送出线路适用性分析[J]. 电力自动化设备, 2016,36(9):74-79. CHEN Linhao, ZHANG Jinhua, DU Jinsong, et al. Applicability of phase-comparison distance protection based on polarized voltage for outgoing transmission line of DFIG-based wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9):74-79.
- [4] 武晗, 孙建龙, 乔黎伟, 等, 考虑 LVRT 的风电场馈线短路电流特 性与保护整定计算[J]. 电网技术,2016,40(10):3019-3028. WU Han, SUN Jianlong, QIAO Liwei, et al. Short circuit current characteristics and calculation of current protection setting of feeder lines in wind farms considering LVRT[J]. Power System Technology, 2016, 40(10); 3019-3028.
- [5] 张保会,李光辉,王进,等. 风电接入电力系统故障电流的影响因 素分析及对继电保护的影响[J]. 电力自动化设备,2012,32(2): 1-8

ZHANG Baohui, LI Guanghui, WANG Jin, et al. Affecting factors of grid-connected wind power on fault current and impact on protection relay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2):1-8.

- [6] MORREN J, HANA S W H D. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1):174-180.
- [7] 李辉,赵猛,叶仁杰,等. 电网故障下双馈风电机组暂态电流评估 及分析[J]. 电机与控制学报,2010,14(8):45-51.

LI Hui, ZHAO Meng, YE Renjie, et al. Evaluation and analysis

of transient current of a DFIG wind generation system under grid fault[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(8): 45-51.

- [8] PANNELL G, ATKINSON D J, ZZHAWI B. Analytical study of grid-fault response of wind turbine doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(4): 1081-1091.
- [9] 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.
- [10] 郑涛,魏占朋,迟永宁,等.考虑撬棒保护动作时间的双馈式风 电机组短路电流特性[J].电力系统自动化,2014,38(5);25-30. ZHENG Tao,WEI Zhanpeng,CHI Yongning,et al. Short-circuit current characteristic of doubly fed induction generator considering crowbar protection insertion time[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(5);25-30.
- [11] 黄涛,陆于平,凌启程,等. 撬棒电路对风电场侧联络线距离保护的影响及对策[J]. 电力系统自动化,2013,37(17):30-36. HUANG Tao,LU Yuping,LING Qicheng, et al. Impact of crowbar on wind farm side interconnection line distance protection and mitigation method[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(17):30-36.
- [12] 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.
- [13] 张保会,张金华,原博,等.风电接入对继电保护的影响(六)—— 风电场送出线路距离保护影响分析[J].电力自动化设备,2013, 33(6):1-6.

ZHANG Baohui, ZHANG Jinhua, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection (6): analysis of distance protection for wind farm outgoing transmission line [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 1-6.

[14] 黄涛,陆于平. 投撬棒后双馈风机暂态电势的变化特性分析[J].
 电网技术,2014,38(10):2759-2765.
 HUANG Tao,LU Yuping. Analysis on transient EMF variation

characteristic of doubly fed induction generator after crowbar

protection activated [J]. Power System Technology , 2014 , 38 $(10)\,;2759\text{-}2765.$

- [15] 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.
- [16] 欧阳金鑫, 王利平, 熊小伏, 等. 双馈风电机组多机并联运行的 短路电流特征及其机理[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 74-80.

OUYANG Jinxin, WANG Liping, XIONG Xiaofu, et al. Characteristics and mechanism of short-circuit currents contributed by doubly-fed wind turbines under parallel operation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3):74-80.

- [17] 周念成,罗艾青,王强钢,等. 含多感应发电机的配电网短路计 算对称分量法[J]. 电力系统自动化,2013,37(11):65-70. ZHOU Niancheng,LUO Aiqing,WANG Qianggang,et al. Symmetrical components method for short-circuit current calculation of induction generator in distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(11):65-70.
- [18] 王燕萍,郑涛,王增平,等.不同转差率对双馈风机撬棒投入后的短路电流影响分析[J].电力系统保护与控制,2015,43(17): 8-14.

WANG Yanping, ZHENG Tao, WANG Zengping, et al. Impact analysis of different slips on the short circuit current of DFIG after crowbar operation [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43 (17):8-14.

作者简介:



张金华(1993—), 女, 山西忻州人, 博士研究生, 研究方向为新能源接入电力系统故障特征分析及其对保护的影响(E-mail: xjtuzihapy@163.com);

张保会(1953—),男,河北魏县人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统 继电保护、安全自动装置、电力系统通信等 (**E-mail**:bhzhang@mail.xitu.edu.cn)。

张金华

Short circuit current calculation method of power system integrated with DFIG based on equivalent sequence circuits

ZHANG Jinhua, ZHANG Baohui, CHEN Linhao, HAO Zhiguo

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

Abstract: To calculate the short circuit current distribution in power system integrated with DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) conveniently and accurately, the rotor speed frequency and power frequency equivalent sequence circuits of DFIG with Crowbar protection are proposed, based on which, a short circuit current calculation method of the system is given. The analytic expressions of power frequency component and rotor speed frequency component of DFIG flux linkage are obtained by solving the state differential equation of DFIG flux linkage with Crowbar protection. Based on this, the space vector equation of DFIG voltage is decomposed into rotor speed frequency and power frequency components, to obtain the equivalent sequence circuits for rotor speed frequency and power frequency respectively according to the relationship between space vector and phasor. The negative and positive sequence equivalent circuits of rotor speed frequency are passive impedance and electric potential with internal impedance respectively and the negative and positive sequence equivalent circuits of power frequency are both passive impedance. Based on the equivalent circuits the short circuit currents in power system integrated with DFIG can be calculated with only DFIG electric machine parameters and initial conditions of failure without simulation. The system integrated with DFIG is simulated in PSCAD to verify the effectiveness of the equivalent circuits and short circuit current calculation method with different faults in the system.

Key words: DFIG; Crowbar protection; short circuit currents; sequence network circuits; equivalent circuits; rotor speed frequency