具备内部故障仿真能力的永磁同步发电机 电磁暂态建模与仿真方法

邹 明,许建中,赵成勇

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要:对永磁同步发电机(PMSG)内部定子绕组故障的精确建模与仿真有助于设计有效的状态检测系统和控 制保护策略。首先对PMSG内部故障特征进行分析和详细的数学推导,给出了适合电磁暂态(EMT)建模的 状态空间形式的动态方程。进而提出了一种PMSG内部故障EMT建模与仿真方法,并推导出其等效电路。 利用MATLAB对推导出的方程进行了数值计算迭代求解,并在PSCAD/EMTDC中搭建了PMSG测试模型, 与数值计算结果进行分析和对比验证。分析结果表明,PMSG内部故障会在短路路径中产生较大的循环故障 电流,但是从发电机外部特性很难判断是否发生内部故障。对比验证结果表明,所建立PMSG内部故障EMT 模型可准确反映内部故障特征,验证了所提建模方法的正确性。

关键词:永磁同步发电机;定子绕组内部故障;数值计算;电磁暂态;等效模型

中图分类号:TM743

文献标志码:A

DOI: 10.16081/j.epae.202306022

0 引言

海上风电具有年利用小时数高、不占用土地资 源、资源丰富、便于就地消纳等特点,其快速发展将 助力2030年碳达峰、2060年碳中和目标的实现。永 磁同步发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)具有无励磁绕组、效率高等优势,被广 泛应用于海上风电机组。但大容量、远距离的海上 风电机组面临故障维修困难、停运损失大等问题[1]。

PMSG 内部故障按故障位置可分为轴承、定子 绕组、转子绕组等,其中定子绕组故障是除机械故障 外最常见的,约占内部故障的21%[2]。定子绕组故 障中最主要的故障类型为匝间短路故障和相间短路 故障[34]。这种类型的故障是由作用在定子绕组上 的各种热、电、机械、环境应力引起绕组绝缘恶化并 击穿导致的[5-7]。匝间短路或相间短路故障既不影 响发电机的外部特性,又不会启动保护系统,但是会 在短路路径中产生较大的循环故障电流,引起局部 升温、降低效率、加速绝缘退化过程,甚至造成永磁 体退磁,给PMSG造成严重损坏[8-10]。

近年来,PMSG内部定子绕组故障的建模和分 析得到了学者们的广泛关注。双反应理论是PMSG 建模的基本理论,由于其预先假设定子绕组是对称

收稿日期:2022-12-17;修回日期:2023-04-24

在线出版日期:2023-07-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52277094);中国华 能集团有限公司总部科技项目(HNKJ20-H88)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (52277094) and the Science and Technology Project of the Headquarters of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ20-H88)

的,因此不适用于定子绕组发生内部故障导致结构 不对称的情况。文献[11-12]提出了一种PMSG匝间 短路故障建模方法,但是未考虑转子阻尼效应,这会 影响建模的准确性[10],且未对相间短路故障进行建 模分析。文献[13]基于绕组函数理论,根据真实绕 组分布,计算时变的绕组电感、磁动势等参数,计算 量大且时变参数较难获取。文献[14-17]采用有限 元建模法建立电机模型,这种方法精度高,但是耗费 时间长,且方程的收敛取决于初始值,其适用性有待 研究。文献[18]提出了一种磁等效电路建模方法, 这种方法的单元数较有限元法少,因此其耗时大幅 缩短,但是其精度较低。文献[19]提出了一种简化 分段建模方法,这种方法降低了模型的复杂度,但是 相应的误差偏大。文献[20]基于多回路理论进行发 电机定子绕组内部故障仿真,但是回路法推导复杂, 且方程带有时变系数,计算量大。

综上,针对PMSG内部定子绕组故障的研究,大 多缺乏数学模型基础以及等效电路建模方法,并且 商业仿真软件中提供的PMSG模型不支持发电机内 部定子绕组故障的仿真。因此,有必要提出一种可 以反映发电机内部定子绕组故障的PMSG电磁暂态 (electromagnetic transient, EMT)建模与仿真方法, 为故障检测及保护研究提供模型基础。

本文深入挖掘 PMSG 内部定子绕组故障特征, 并对其内部定子绕组故障进行严格的数学推导,建 立一组适用于不同故障类型具有统一形式的数学方 程。提出一种PMSG内部定子绕组故障EMT建模与 仿真方法。利用MATLAB对所推导的数学方程进行 数值计算迭代求解,并在PSCAD/EMTDC中搭建了 测试模型进行分析和对比验证。结果表明,PMSG



内部故障前、后,其外部特性几乎保持一致,但是会 在故障回路产生较大故障电流。由仿真结果进一步 分析了不同短匝比和短路电阻对故障电流的影响, 并验证了所提建模方法的有效性。

1 PMSG 内部定子绕组故障数学模型

1.1 非故障态下PMSG数学模型

PMSG 数学模型包含电压方程、磁链方程和运动方程3个部分。三相静止坐标系和两相旋转坐标系下数学模型参考文献[21]。非故障态发电机两相旋转坐标系下标幺值数学方程如式(1)—(4)所示,采用电动机惯例。

$$\boldsymbol{u}_{dq0,d'q'} = \boldsymbol{R}_{dq0,d'q'} \boldsymbol{i}_{dq0,d'q'} + \frac{\mathrm{d} \boldsymbol{\Psi}_{dq0,d'q'}}{\mathrm{d} t} + \boldsymbol{e}$$
 (1)

$$\boldsymbol{\Psi}_{dq0,d'q'} = \boldsymbol{L}_{dq0,d'q'} \boldsymbol{i}_{dq0,d'q'} + \boldsymbol{\Psi}_{P}$$
 (2)

$$J\frac{\mathrm{d}\omega_{\mathrm{r}}}{\mathrm{d}t} = T_{\mathrm{m}} - T_{\mathrm{e}} - K_{\mathrm{D}}\omega_{\mathrm{r}} \tag{3}$$

$$\omega_{\rm r} = \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}$$
 (4)

式中: $\mathbf{u}_{dq0.d'q'}$ 为电压列向量,下标 dq0 和 d'q'分别表示 PMSG 定子 d 轴、q 轴、0 轴绕组的电气量以及转子阻 尼绕组的 d 轴、q 轴电气量,后同;R 为电阻矩阵;L 为 电感矩阵;i 为电流列向量; Ψ 为磁链列向量;e 为速 度电动势列向量; Ψ_p 为永磁体磁链列向量;J 为转动 惯量; K_p 为机械阻尼系数; T_m 为机械转矩; T_e 为电磁转矩; ω_r 为转子电角速度; θ 为 d 轴超前 a 相绕组磁轴 的电角度;t 为时间。

1.2 故障态 PMSG 三相静止坐标系下数学模型

在PMSG中,当同一线圈的不同匝之间或不同相线圈的匝之间因绝缘击穿而互相接触时,就会发生匝间短路故障或相间短路故障,形成短路路径。在不失通用性的前提下,假设匝间短路故障发生在定子a相绕组,相间短路故障发生在定子a相绕组和b相绕组之间。PMSG匝间短路故障和相间短路故障下的定子绕组电路结构及电感分布分别如图 1和附录 A图 A1 所示。图中:u、i、 Ψ 分别为 PMSG 机端电压、电流、磁链,下标a、b、c表示三相绕组, Ψ_{a1} 、 Ψ_{a2} 分别为故障相绕组非故障匝和故障匝的磁链,故障磁链 $\Psi_{i}=\Psi_{a2}$;R、L分别为 PMSG 定子绕组电阻、电感; R_{s} 为短路电阻; i_{i} 为匝间短路故障下的故障电流,下标f表示匝间短路故障; $\mu=N_{i}/N_{w}$ 为短匝比,其表示故障范围为 $0\sim1$, N_{w} 为单相定子绕组总匝数, N_{i} 为发生匝间故障时单相定子绕组部分匝数。

定子绕组采用星形接地连接方式,假设定子电流方向遵循电动机惯例。转子电路包含2个阻尼绕组,分别与d轴和q轴同轴。图A1中蓝色线所围路径为故障环,不与阻尼绕组交链。故障电流 i_r 流过短路电阻 R_g , R_g 的大小取决于故障的严重程度,当 R_g 接近于0时,故障演变为完全的匝间或相间短路故障。

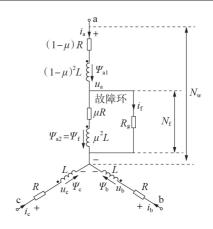


图 1 PMSG 定子绕组匝间短路故障电路结构及电感分布

Fig.1 Circuit structure and inductance distribution of PMSG stator winding under inter-turn short circuit fault

假设非故障相绕组之间互感为M,则故障相绕组故障部分和非故障部分与非故障相绕组之间的互感分别为 μM 和($1-\mu$)M。故障相绕组故障部分和非故障部分之间也存在大小为 μ ($1-\mu$)L的互感。

根据图1所示定子绕组电路结构,三相静止坐标系下发生匝间短路故障时PMSG故障支路、非故障支路和故障环的电压方程分别见式(5)—(7)。

$$u_{a} = (1 - \mu)Ri_{a} + \mu R(i_{a} - i_{f}) + \frac{d\Psi_{a1}}{dt} + \frac{d\Psi_{a2}}{dt} = Ri_{a} - \mu Ri_{f} + \frac{d\Psi_{a}}{dt}$$
(5)

$$\boldsymbol{u}_{bc} = R\boldsymbol{i}_{bc} + \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\Psi}_{bc}}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

$$\mu R(i_{a}-i_{f})-R_{g}i_{f}+\frac{d\Psi_{a2}}{dt}=\mu Ri_{a}+(-\mu R-R_{g})i_{f}+\frac{d\Psi_{f}}{dt}=0 (7)$$

转子阻尼绕组的电压方程与式(1)相同,因此可得PMSG匝间短路故障下电压方程,如式(8)所示。

$$\mathbf{u}_{\text{abc},f,d'q'} = \mathbf{R}_{\text{abc},f,d'q'} \mathbf{i}_{\text{abc},f,d'q'} + \frac{\mathbf{d}\mathbf{\Psi}_{\text{abc},f,d'q'}}{\mathbf{d}t}$$
(8)
$$\begin{bmatrix}
\mathbf{u}_{\text{abc},f,d'q'} = [u_{\text{a}}, u_{\text{b}}, u_{\text{c}}, 0, 0, 0]^{\text{T}} \\
\mathbf{i}_{\text{abc},f,d'q'} = [i_{\text{a}}, i_{\text{b}}, i_{\text{c}}, i_{\text{f}}, i_{\text{d}'}, i_{\text{q}'}]^{\text{T}} \\
\mathbf{\Psi}_{\text{abc},f,d'q'} = [\mathbf{\Psi}_{\text{a}}, \mathbf{\Psi}_{\text{b}}, \mathbf{\Psi}_{\text{c}}, \mathbf{\Psi}_{\text{f}}, \mathbf{\Psi}_{\text{d}'}, \mathbf{\Psi}_{\text{q}'}]^{\text{T}}
\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}
\mathbf{R} & 0 & 0 & -\mu R & 0 & 0 \\
0 & R & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & R & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & R & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & -\mu R - R_{\text{g}} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & R_{\text{d}'} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & R_{\text{d}'} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{\text{d}'} & 0
\end{bmatrix}$$

由图1电感分布可得PMSG 匝间短路故障三相静止坐标系下故障支路、非故障支路和故障环的磁链方程,如式(10)—(12)所示。

$$\Psi_{a} = \mu^{2} L (i_{a} - i_{f}) + (1 - \mu)^{2} L i_{a} + \mu (1 - \mu) L (2i_{a} - i_{f}) + M i_{b} + M i_{c} = L i_{a} + M i_{b} + M i_{c} - \mu L i_{f}$$
(10)



$$\begin{cases} \Psi_{\rm b} = Li_{\rm b} + Mi_{\rm c} + (1 - \mu)Mi_{\rm a} + \mu M(i_{\rm a} - i_{\rm f}) = \\ Mi_{\rm a} + Li_{\rm b} + Mi_{\rm c} - \mu Mi_{\rm f} \\ \Psi_{\rm c} = Li_{\rm c} + Mi_{\rm b} + (1 - \mu)Mi_{\rm a} + \mu M(i_{\rm a} - i_{\rm f}) = \\ Mi_{\rm a} + Mi_{\rm b} + Li_{\rm c} - \mu Mi_{\rm f} \end{cases}$$
(11)

$$\Psi_{f} = \mu^{2} L(i_{a} - i_{f}) + \mu (1 - \mu) L i_{a} + \mu M i_{b} + \mu M i_{c} = \mu L i_{a} + \mu M i_{b} + \mu M i_{c} - \mu^{2} L i_{f}$$
(12)

转子阻尼绕组的磁链方程与式(2)中阻尼绕组部分磁链方程相同,因此可得PMSG 匝间短路故障下磁链方程,如式(13)所示。

$$\Psi_{\text{abc, f}} = L_{\text{abc, f}} i_{\text{abc, f}}$$

$$\left\{ \Psi_{\text{abc, f}} = [\Psi_{a}, \Psi_{b}, \Psi_{c}, \Psi_{f}]^{\text{T}} \right.$$

$$\left\{ i_{\text{abc, f}} = [i_{a}, i_{b}, i_{c}, i_{f}]^{\text{T}} \right.$$

$$\left\{ L_{\text{abc, f}} = \begin{bmatrix} L & M & M & -\mu L \\ M & L & M & -\mu M \\ M & M & L & -\mu M \\ \mu L & \mu M & \mu M & -\mu^{2} L \end{bmatrix} \right.$$

$$\left\{ \Psi_{d'} = L_{ad'} i_{d} + L_{d'} i_{d'} + \Psi_{m} \right.$$

$$\left\{ \Psi_{c} = L_{cd'} i_{c} + L_{cd'} i_{c'} \right.$$
(13)

式中: $L_{ad'}$ 和 $L_{aq'}$ 分别为 a 相绕组与d、q 轴阻尼绕组间互感; Ψ_{m} 为永磁体磁链; $L_{abc,f}$ 为匝间短路故障下的电感矩阵。

1.3 故障态 PMSG 两相旋转坐标系下数学模型

非故障态 PMSG 两相旋转坐标系下的数学方程可直接应用派克变换得到。但是当发生内部故障后,定子绕组不再对称,因此在应用派克变换推导内部故障 PMSG 两相旋转坐标系下数学模型时需额外处理。定义矩阵 P_T 为:

$$P_{T} = \begin{bmatrix} P & 0 \\ 0 & 1 & \text{IV} I_{3} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$I_{3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(16)$$

式中:P为派克变换矩阵; I_3 为3阶单位矩阵。

1.3.1 电压方程

利用式(16)所示变换矩阵,对式(8)所示电压方程中的磁链项进行变换,可得式(18)。

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\varPsi}_{\mathrm{abc},f,d'q'}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{P}_{\mathrm{T}}^{-1}\boldsymbol{\varPsi}_{dq0,f,d'q'}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{P}_{\mathrm{T}}^{-1}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\varPsi}_{dq0,f,d'q'}}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{P}_{\mathrm{T}}^{-1}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{\varPsi}_{dq0,f,d'q'}$$
(18)

式(18)中第二个等号两侧同乘以 P_{T} 可得:

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\varPsi}_{dq0,f,d'q'}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{P}_{\mathrm{T}} \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\varPsi}_{\mathrm{abc},f,d'q'}}{\mathrm{d}t} - \boldsymbol{P}_{\mathrm{T}} \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{P}_{\mathrm{T}}^{-1}}{\mathrm{d}t} \boldsymbol{\varPsi}_{dq0,f,d'q'} \quad (19)$$

将式(8)代入式(19)可得 PMSG 匝间短路故障 两相旋转坐标系下的电压方程为:

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\Psi}_{dq0,f,d'q'}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{P}_{\mathrm{T}} (\boldsymbol{u}_{\mathrm{abc},f,d'q'} - \boldsymbol{R}_{\mathrm{abc},f,d'q'} \boldsymbol{P}_{\mathrm{T}}^{-1} \boldsymbol{i}_{dq0,f,d'q'}) - \boldsymbol{e}_{\mathrm{f}} = \\
\boldsymbol{u}_{dq0,f,d'q'} - \boldsymbol{P}_{\mathrm{T}} \boldsymbol{R}_{\mathrm{abc},f,d'q'} \boldsymbol{P}_{\mathrm{T}}^{-1} \boldsymbol{i}_{dq0,f,d'q'} - \boldsymbol{e}_{\mathrm{f}} = \\
\boldsymbol{u}_{dq0,f,d'q'} - \boldsymbol{R}_{dq0,f,d'q'} \boldsymbol{i}_{dq0,f,d'q'} - \boldsymbol{e}_{\mathrm{f}} \qquad (20)$$

$$\begin{vmatrix} \boldsymbol{u}_{dq0,f,d'q'} = [\boldsymbol{u}_{d}, \boldsymbol{u}_{q}, \boldsymbol{u}_{0}, 0, 0, 0]^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{i}_{dq0,f,d'q'} = [\boldsymbol{i}_{d}, \boldsymbol{i}_{q}, \boldsymbol{i}_{0}, \boldsymbol{i}_{f}, \boldsymbol{i}_{d'}, \boldsymbol{i}_{q'}]^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{\Psi}_{dq0,f,d'q'} = [\boldsymbol{\Psi}_{d}, \boldsymbol{\Psi}_{q}, \boldsymbol{\Psi}_{0}, \boldsymbol{\Psi}_{f}, \boldsymbol{\Psi}_{d'}, \boldsymbol{\Psi}_{q'}]^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{e}_{\mathrm{f}} = [-\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{r}} \boldsymbol{\Psi}_{d}, \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{r}} \boldsymbol{\Psi}_{q}, 0, 0, 0, 0]^{\mathrm{T}} \end{vmatrix}$$

$$R_{dq0,f,d'q'} = \mu R \begin{bmatrix} \frac{1}{\mu} & 0 & 0 & -\frac{2}{3}\cos\theta & 0 & 0\\ 0 & \frac{1}{\mu} & 0 & \frac{2}{3}\sin\theta & 0 & 0\\ 0 & 0 & \frac{1}{\mu} & -\frac{1}{3} & 0 & 0\\ \cos\theta & -\sin\theta & 1 & -1 & -\frac{R_g}{\mu R} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R_{d'}}{\mu R} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R_{q'}}{\mu R} \end{bmatrix}$$

1.3.2 磁链方程

同理,磁链方程式(13)等号两侧同乘以 P_{T} (此时 P_{T} 右下角为常数1)可得:

$$\Psi_{dq0,f} = P_{T} \Psi_{abc,f} = P_{T} L_{abc,f} i_{abc,f} = \begin{bmatrix} L_{d} & 0 & 0 \\ 0 & L_{q} & 0 \\ 0 & 0 & L_{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{d} \\ I_{q} \\ I_{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{m} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - P\mu \begin{bmatrix} L \\ M \\ M \end{bmatrix} i_{f} \\ \mu \begin{bmatrix} L, M, M \end{bmatrix} P_{T}^{-1} \begin{bmatrix} I_{d} \\ I_{q} \\ I_{0} \end{bmatrix} - \mu^{2} L i_{f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_{d}}{C} & 0 & 0 & -\frac{2}{3} \cos \theta \\ 0 & \frac{L_{q}}{C} & 0 & \frac{2}{3} \sin \theta \\ 0 & 0 & \frac{L_{0}}{C} & -\frac{D}{3} \\ \cos \theta & -\sin \theta & D & -\frac{\mu L}{L - M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{d} \\ I_{q} \\ I_{0} \\ i_{f} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_{m} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} (23)$$

$$\begin{cases} C = \mu (L - M) \\ D = \frac{L + 2M}{L - M} \end{cases}$$

$$(24)$$

联立式(14)和式(23)可得PMSG 匝间短路故障两相旋转坐标系下磁链方程为:

$$\Psi_{dq0,f,d'q'} = L_{dq0,f,d'q'} i_{dq0,f,d'q'} + \Psi_{P}$$
 (25)

$$\boldsymbol{\Psi}_{\mathrm{p}} = [\boldsymbol{\Psi}_{\mathrm{m}}, 0, 0, 0, \boldsymbol{\Psi}_{\mathrm{m}}, 0]^{\mathrm{T}} \tag{26}$$

1.3.3 完整数学模型

将磁链方程式(25)代入电压方程式(20)中,消去磁链项,即可得到PMSG完整数学模型为:

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{i}_{dq0,f,d'q'}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{L}_{dq0,f,d'q'}^{-1} \boldsymbol{u}_{dq0,f,d'q'} - \boldsymbol{L}_{dq0,f,d'q'}^{-1} \boldsymbol{W}_{P} - L_{dq0,f,d'q'}^{-1} + \boldsymbol{L}_{dq0,f,d'q'}^{-1} + \boldsymbol{W}) \boldsymbol{i}_{dq0,f,d'q'} \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix}
 L_{dq0,f,d'q'} & 0 & 0 & 0 & -\frac{2}{3}\sin\theta \\
 0 & 0 & 0 & -\frac{2}{3}\cos\theta \\
 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{\sin\theta\cos\theta}{0} & 0 & 0
\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{W} = E \begin{bmatrix}
 0 & \frac{L_{q}}{C} & 0 & \frac{2}{3}\sin\theta & 0 & \frac{L_{aq'}}{C} \\
 -\frac{L_{d}}{C} & 0 & 0 & \frac{2}{3}\cos\theta - \frac{L_{ad'}}{C} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{W}_{P} = [0, \omega_{r}\boldsymbol{\Psi}_{m}, 0, 0, 0, 0]^{T}$$

$$E = -\mu\omega_{r}(L-M)$$

相间短路故障下PMSG的数学模型见附录B。

2 PMSG内部定子绕组故障建模方法

下面利用后退欧拉数值积分方法提出一种PMSG内部定子绕组故障状态EMT建模方法。由第1章及附录B中PMSG内部故障下的数学模型推导过程可知,匝间短路故障和相间短路故障方程在形式上完全统一,仅方程中部分元素不同,因此本文所提建模方法同时适用于这2种故障类型。

2.1 EMT 建模方法

将式(27)进行离散化处理,整理可得:

$$\mathbf{i}_{dq0,f,d'q'}(t) = [\mathbf{I}_{6} + \Delta t \mathbf{L}_{dq0,f,d'q'}^{-1}(\mathbf{R}_{dq0,f,d'q'}^{-1} + \mathbf{L}_{dq0,f,d'q'}' + \mathbf{W})]^{-1} \times \\
[\Delta t \mathbf{L}_{dq0,f,d'q'}^{-1}(\mathbf{u}_{dq0,f,d'q'}(t) - \mathbf{W}_{P}(t)) + \\
\mathbf{i}_{de0,f,d'a'}(t - \Delta t)]$$
(29)

式中: I_6 为6阶单位矩阵; Δt 为仿真步长。

将式(29)进行派克反变换,可得三相静止坐标系下PMSG内部故障状态机端电流表达式为:

$$\mathbf{i}_{\text{abc, f, }d'q'}(t) = \mathbf{P}_{\text{T}}^{-1} \mathbf{i}_{dq0, \text{f, }d'q'}(t)$$
 (30)

将运动方程式(3)、(4)进行离散化可得:

$$\begin{cases} \omega_{r}(t) = \frac{\Delta t \left(T_{m}(t) - T_{e}(t)\right) + J\omega_{r}(t - \Delta t)}{J + \Delta t K_{D}} \\ \theta(t) = \theta(t - \Delta t) + \Delta t\omega_{r}(t) \end{cases}$$
(31)

由式(29)、(30)可得 PMSG 内部故障状态下的 等效电路如图 2 所示。其中,3个受控电流源分别表 示发电机的定子电路、故障环回路以及 2 个阻尼绕 组回路。

由于模型只能存储历史值,t时刻转子转速值

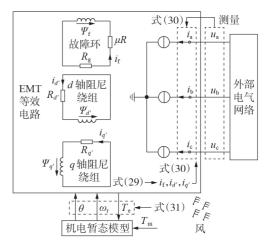


图 2 PMSG内部故障状态等效电路

Fig.2 Equivalent model of PMSG under internal faults

 $\omega_{\rm r}(t)$ 需要预测。考虑发电机惯量大、转子转速变化慢,因此使用线性外推法预测转子转速,如式(32)所示。

$$\omega_r(t) = \omega_r(t - \Delta t) + (\omega_r(t - \Delta t) - \omega_r(t - 2\Delta t))$$
 (32)

所提建模方法不要求 PMSG 参数保持不变,只要已知参数如何变化,将变化的参数代入方程离散 化求解即可。

2.2 建模流程

通过在PSCAD 自定义元件的 DSDYN 和 DSOUT 段编写代码可以实现 PMSG 的等效建模。PMSG 的 等效建模过程及解算流程见附录 C图 C1。具体步骤如下:

- 1)仿真开始后,根据式(31)、(32)计算 $\theta(t)$ 、 $\omega_{r}(t)$,同时测量PMSG机端电压 $u_{shr}(t)$;
 - 2)由式(30)计算PMSG等效电路受控电流源值;
- 3)将 PMSG 等效电路与外部电气网络相连接,通过 EMTDC 解算器获得整个系统节点电压方程,并对此方程进行求解,可得更新后的 PMSG 机端电压;
- 4)由式(29)更新定子电流 $i_{dq0}(t)$ 、转子电流 $i_{dqf}(t)$ 和故障环电流 $I_{f}(t)$,将更新完的参数作为下一个步长的历史值进行存储,并进入下一个步长仿真。

3 PMSG内部故障数值计算与EMT仿真

本章在 PSCAD / EMTDC 中搭建了详细模型 (detailed model, DM),并采用第2章 PMSG建模方法 搭建了等效模型(equivalent model, EM),同时利用 MATLAB对 PMSG 的数学微分方程直接进行数值计算迭代求解。设置外部系统等值阻抗为1 Ω ,测试系统参数见附录D表D1。

首先分析了未发生内部故障时EM、MATLAB数值计算与DM在机端短路工况下的仿真波形,验证了建模过程的正确性。其次将PMSG内部故障时数值计算结果与EM的EMT仿真结果进行对比,分析了PMSG内部故障对机端电压、电流、有功功率的影

155

响,以及故障短路电流的影响因素,验证了所提内部 故障模型的准确性。

3.1 PMSG机端短路故障

0.5 s时,在测试系统 PMSG 机端发生三相短路故障,持续 50 ms,1.0 s时仿真结束。图 3 给出了 PMSG 机端三相短路故障时,DM、EM以及 MATLAB 数值计算的对比结果。图中:P为 PMSG 发出的有功功率;电磁转矩 T。为标幺值。

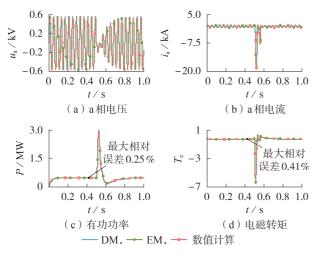


图 3 PMSG 机端短路故障结果对比

Fig.3 Comparison of PMSG terminal short circuit fault result

由图 3 可知,0.5 s 时,PMSG 机端发生三相短路故障,机端电压瞬间跌落,a 相电流峰值达到稳态电流的 32.68 倍,同时导致有功功率和电磁转矩幅值增大。EM、MATLAB数值计算结果与DM重合度很高,最大相对误差为 0.41 %,验证了所提 PMSG 建模过程的正确性。

3.2 PMSG内部故障

在测试系统中分别设置了非故障态、PMSG内部故障2类工况。测试系统中,短匝比 μ 为0.1,短路电阻 $R_{\rm g}$ 为0.0001 p.u.。具体时序如下:[0,0.4) s时,系统启动并达到稳定状态;0.4 s时,PMSG发生内部故障;1.0 s时仿真结束。

图4给出了PMSG发生匝间短路故障前、后数值 计算结果与EM的EMT仿真波形。图中: i_{d_1} 、 u_{d_2} 为标 幺值;实线波形为数值计算结果,虚线波形为EMT仿 真结果。相间短路故障下仿真波形见附录D图D1。

由图 4、D1 可看出,PMSG 发生内部故障前、后,机端电流、电压波形与稳态下波形基本一致,说明PMSG 内部故障对电机的外部特性影响很小,无法启动保护系统。内部故障发生后,三相回路将感应电流,其产生的磁链中的恒定分量在空间中合成为静止磁动势;在空间旋转的永磁体转子,其直轴和交轴磁阻不同,作周期性变化,频率为基频的2倍。因此,PMSG 输出的有功功率出现2倍基频的振荡,振

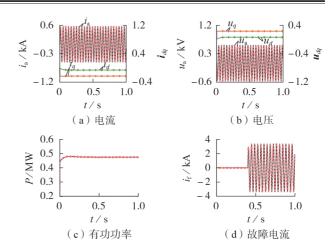


图 4 PMSG 匝间短路故障下数值计算与 EMT 仿真结果 Fig.4 Numerical calculation and EMT simulative results of PMSG inter-turn short circuit fault

荡幅值取决于交直轴磁阻之差,其幅值较小,如图4(c)所示。同时PMSG内部故障会在故障回路中产生较大的故障循环电流,由图4(d)、D1(d)可知,匝间短路故障和相间短路故障的故障电流可分别达到非故障态下电机机端电流的5.96倍和3.64倍。由于PMSG内部故障前、后外部特性基本保持一致,故很难发现内部故障是否发生,若故障长时间得不到清除,会引起电机绕组局部过热,可能进一步引发绝缘击穿,导致故障演化为更严重的故障类型。PMSG内部故障下数值计算与EMT仿真结果的最大相对误差见表1。

表 1 数值计算与 EMT 仿真结果的最大相对误差

Table 1 Maximum relative errors between numerical calculation and EMT simulative results

十年 12年 米 五川	最大相对误差 / %				
故障类型	i_d	$i_{_q}$	u_d	u_{q}	P
匝间短路	0.89	0.65	1.85	0.17	1.45
相间短路	1.38	0.61	1.72	0.61	1.47

由图 4、D1 和表 1 可知, PMSG 内部故障数值计算结果与 EMT 仿真结果重合度很高, 它们之间的最大相对误差不超过 1.85%, 验证了所提 PMSG 内部故障 EMT 建模方法的正确性和精度。

3.3 PMSG内部故障短路电流影响因素

为分析 PMSG 内部故障短路电流的影响因素,保持其他参数相同的情况下,在测试系统中分别设置不同短匝比和短路电阻,对比此时短路电流的大小。具体参数设置如下:①当短路电阻 R_g =0.0001 p.u.时,短匝比 μ 分别设置为 0.2、0.4、0.8;②当短匝比 μ =0.2时,匝间短路故障的短路电阻 R_g 分别设置为 0、0.0005、0.001 p.u.,相间短路故障的短路电阻 R_g 分别设置0、0.05、0.1 p.u.。

当发生匝间短路时,不同短匝比和不同短路电

阻下,PMSG 故障电流的数值计算结果与EMT 仿真波形对比图如图 5 所示。相间短路波形对比图见附录D图 D2。图中: $i_{\rm t}$ 为标幺值;实线波形为数值计算结果,虚线波形为EMT 仿真结果。由图 5 可知,当故障环路径中电阻越小,即短匝比 μ 越小、短路电阻 $R_{\rm g}$ 越小时,PMSG 故障环中的故障电流 $i_{\rm t}$ 越大。短路电阻会改变 PMSG 内部电阻与电抗比值,因而对故障电流相位有一定偏移作用。由图 D2 可知,在相同的短匝比 μ 和短路电阻 $R_{\rm g}$ 下,由于相间短路故障环的路径相较于匝间短路故障环路径长,因此相间短路故障时的故障电流更小。

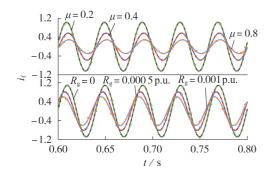


图 5 不同短匝比和短路电阻匝间短路故障电流波形 Fig.5 Current waveforms of inter-turn short circuit fault under different short-turn ratios and short circuit resistances

由数值计算结果和EMT仿真对比可知,本文所 提建模方法建立的PMSG内部故障模型可以准确反 映PMSG定子绕组匝间短路和相间短路故障特性。 EMT仿真波形与数值计算结果基本重合,验证了所 建立的PMSG内部故障EMT建模方法的正确性。

4 结论

本文提出了一种PMSG内部故障EMT建模与仿真方法。通过分析PMSG内部故障电路结构和电感分布,推导出一组具有状态空间形式的定子绕组故障数学方程,不同故障类型数学方程形式上统一。进而提出了一种适用于不同PMSG内部定子绕组故障类型的EMT建模方法,并推导出其等效仿真电路结构及参数。利用MATLAB进行数值计算迭代求解,并在PSCAD/EMTDC中搭建了本文所提建模方法建立的PMSG模型,然后与数值计算结果进行分析和对比验证。结果表明:

- 1)PMSG内部故障会在故障环中产生较大故障 电流,但故障前、后PMSG外部特性基本保持一致, 因此很难判断内部故障是否发生,若处理不当,可能 导致故障进一步恶化;
- 2)PMSG内部故障的故障电流大小受到短匝比 μ 和短路电阻 R_s 的影响,数值计算与 EMT 仿真对比 验证结果表明,所提建模方法可准确反映 PMSG内部

定子绕组故障特性,验证了所提建模方法的正确性;

3)所提方法解决了商业仿真软件不支持仿真发电机内部定子绕组故障的问题,为 PMSG 内部定子绕组故障检测及保护策略研究提供模型基础。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 曾祥军,冯琛,杨明,等. 考虑运行状态相似性的风电机组数据异常检测方法[J]. 电力系统自动化,2022,46(11):170-180. ZENG Xiangjun,FENG Chen,YANG Ming,et al. Data anomaly detection method for wind turbines considering operation state similarity[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(11):170-180.
- [2] BONNETT A H, YUNG C. Increased efficiency versus increased reliability[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2008, 14(1):29-36.
- [3] ŞAHIN İ, KEYSAN O. Model predictive controller utilized as an observer for inter-turn short circuit detection in induction motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36 (2):1449-1458.
- [4] 田代宗,孙宇光,王善铭,等. 多相整流永磁同步发电机绕组内 部相间短路的故障分析[J]. 电工技术学报,2020,35(6):1262-1271
 - TIAN Daizong, SUN Yuguang, WANG Shanming, et al. Analysis of stator internal phase-to-phase short-circuit in the multiphase permanent magnet synchronous generator with rectifier load system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6):1262-1271.
- [5] 李俊卿,李斯璇,陈雅婷,等. 一种基于 CGAN-CNN 的同步电 机转子绕组匝间短路故障诊断方法[J]. 电力自动化设备,2021,41(8):169-174.
 - LI Junqing, LI Sixuan, CHEN Yating, et al. Fault diagnosis method of inter-turn short circuit of rotor winding of synchronous motor based on CGAN-CNN[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8):169-174.
- [6] HU R G, WANG J B, MILLS A R, et al. High-frequency voltage injection based stator interturn fault detection in permanent magnet machines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1):785-794.
- [7] 何玉灵,孙凯,王涛,等. 基于变分模态分解与精细复合多尺度 散布熵的发电机匝间短路故障诊断[J]. 电力自动化设备,2021, 41(3):164-172.
 - HE Yuling, SUN Kai, WANG Tao, et al. Fault diagnosis of generator interturn short circuit fault based on variational mode decomposition and refined composite multiscale dispersion entropy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3):164-172.
- [8] LEE H, JEONG H, KOO G, et al. Attention recurrent neural network-based severity estimation method for interturn shortcircuit fault in permanent magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68 (4): 3445-3453.
- [9] GANDHI A, CORRIGAN T, PARSA L. Recent advances in modeling and online detection of stator interturn faults in electrical motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5):1564-1575.
- [10] OJAGHI M, BAHARI V. Rotor damping effects in dynamic modeling of three-phase synchronous machines under the stator interturn faults-winding function approach [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3):3020-3028.
- [11] ROMERAL L, URRESTY J C, RIBA RUIZ J R, et al. Mode-



- ling of surface-mounted permanent magnet synchronous motors with stator winding interturn faults [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5):1576-1585.
- [12] 刘毅,郑志国. 基于参数模型永磁同步电机定子绕组匝间短路 故障研究[J]. 电机与控制应用,2015,42(10):48-54. LIU Yi, ZHENG Zhiguo. Study for short-circuit fault of permanent magnet motor based on parameters model[J]. Electric Machines & Control Application,2015,42(10):48-54.
- [13] 骆皓,许祥威,侍正坤,等. 基于多频对极磁场耦合的直驱型双 馈电机电磁耦合特性分析[J]. 电力自动化设备,2021,41(2): 159-165.
 - LUO Hao, XU Xiangwei, SHI Zhengkun, et al. Analysis of electromagnetic coupling characteristics for doubly-fed induction generator based on multi-frequency pole pairs' magnetic field coupling [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41 (2):159-165.
- [14] 张艳辉,郑晓钦,吴新振,等.基于有限元场路耦合的十二相整流发电机系统定子匝间短路分析[J].电工技术学报,2019,34(9):1842-1849.
 - ZHANG Yanhui, ZHENG Xiaoqin, WU Xinzhen, et al. Analysis of stator winding inter-turn short circuit on a 12-phase rectifier generator system based on finite element field-circuit coupling [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(9):1842-1849.
- [15] 龚衡,桂林,周光厚,等. 发电机定子单相接地故障下定子铁芯的电弧烧损过程[J]. 电力自动化设备,2022,42(12):197-203. GONG Heng, GUI Lin, ZHOU Guanghou, et al. Arc burning process of stator core under stator single-phase grounding fault of generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022,42(12):197-203.
- [16] GE B J, XIAO S Y, LIU Z H, et al. Improved model of synchronous generators internal faults based on circuitcoupled FEM [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017,32(3):876-884.
- [17] 许国瑞,胡一平,李伟力,等. 双轴励磁同步电机同步电抗随运

- 行工况的变化规律[J]. 电工技术学报,2020,35(2):236-245. XU Guorui, HU Yiping, LI Weili, et al. The variation law of synchronous reactance along with the operation condition of dual-excited synchronous generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(2):236-245.
- [18] FAIZ J, MOOSAVI S M M, ABADI M B, et al. Magnetic equivalent circuit modelling of doubly-fed induction generator with assessment of rotor inter-turn short-circuit fault indices [J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10 (9): 1431-1440.
- [19] DI J, FLETCHER J E, LI W L. Simplified piecewise model of line-start permanent magnet linear synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(5):6093-6104.
- [20] 牛化敏,桂林,孙宇光,等.基于多回路理论的交流励磁电机定子绕组内部故障仿真与实验研究[J].中国电机工程学报,2019,39(12):3676-3684.
 - NIU Huamin, GUI Lin, SUN Yuguang, et al. Simulation and experimental study on internal fault of stator winding of AC excitation motor based on multi-loop theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12):3676-3684.
- [21] KUNDUR P, BALU N J, LAUBY M G. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994:45-138.

作者简介:

邹 明(1997—),男,博士研究生,主要研究方向为大规模风电场电磁暂态建模及其仿真提速(E-mail:ZouMing@ncepu.edu.cn);

许建中(1987—),男,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为新型电力系统电磁暂态建模和仿真技术(E-mail;xujianzhong@ncepu.edu.cn);

赵成勇(1964—),男,教授,博士研究生导师,主要研究 方向为直流输电(E-mail:chengyongzhao@ncepu.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Electromagnetic transient modeling and simulation method of PMSG with internal fault simulation ability

ZOU Ming, XU Jianzhong, ZHAO Chengyong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Accurate modeling and simulation of the internal stator winding faults of permanent magnet synchronous generator (PMSG) are helpful to design an effective state detection system and control protection strategy. First, the internal fault characteristics of PMSG are analyzed and mathematically derived in detail. The dynamic equations in state space form suitable for electromagnetic transient (EMT) modeling is given. Then the methods of EMT modeling and simulation under PMSG internal faults are proposed, and the equivalent circuit is derived. The derived equations are solved by numerical calculation and iterative solution using MATLAB. Then the PMSG test model is established in PSCAD / EMTDC to analyze and compare with the numerical calculation results. The analysis results show that the internal faults produce a large fault current in the short circuit path and it is difficult to judge whether the internal fault occurs from the external characteristics of PMSG. The comparison and verification results show that the established internal fault EMT model of PMSG can accurately reflect the characteristics, which verifies the correctness of the proposed modeling method.

Key words: permanent magnet synchronous generator; internal stator winding faults; numerical calculation; electromagnetic transient; equivalent model

附录 A

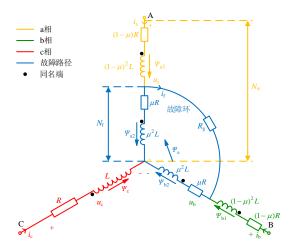


图 A1 PMSG 定子绕组相间短路故障电路结构及电感分布

Fig. A1 Circuit structure and inductance distribution of PMSG stator winding under interphase short circuit fault

附录 B

PMSG 相间短路故障三相静止坐标系下数学模型推导如下:

(1)电压方程

故障支路:

$$u_{a/b} = (1 - \mu)Ri_{a/b} + \mu R(i_a \mp i_f) + \frac{d \Psi_{a/b1}}{dt} + \frac{d \Psi_{a/b2}}{dt} = Ri_{a/b} \mp \mu Ri_f + \frac{d \Psi_{a/b}}{dt}$$
(B1)

非故障支路:

$$u_{\rm c} = Ri_{\rm c} + \frac{\mathrm{d}\,\Psi_{\rm c}}{\mathrm{d}t} \tag{B2}$$

故障环:

$$0 = \mu R[(i_{\rm f} - i_{\rm a}) + (i_{\rm b} + i_{\rm f})] + R_{\rm g}i_{\rm f} + \frac{\mathrm{d}\Psi_{\rm e}}{\mathrm{d}t} = -\mu Ri_{\rm a} + \mu Ri_{\rm b} + (2\mu R + R_{\rm g})i_{\rm f} + \frac{\mathrm{d}\Psi_{\rm e}}{\mathrm{d}t}$$
(B3)

对应式(8),相间短路下 $R_{abc,f,d'g'}$ 表达式如式(B4)所示。

$$\mathbf{R}_{\text{abc,f,}d'q'} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 & -\mu R & 0 & 0\\ 0 & R & 0 & \mu R & 0 & 0\\ 0 & 0 & R & 0 & 0 & 0\\ -\mu R & \mu R & 0 & 2\mu R + R_{\text{g}} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{d'} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{s'} \end{bmatrix}$$
(B4)

(2)磁链方程

故障支路:

$$\begin{split} \Psi_{\text{a/b}} &= \mu^2 L(i_{\text{a/b}} \mp i_{\text{f}}) + (1 - \mu)^2 Li_{\text{a/b}} + (1 - \mu)Mi_{\text{b/a}} + \mu(1 - \mu)L(2i_{\text{a/b}} \mp i_{\text{f}}) + \mu M(i_{\text{b/a}} \pm i_{\text{f}}) + Mi_{\text{c}} \\ &= Li_{\text{a/b}} + Mi_{\text{b/a}} + Mi_{\text{c}} \pm \mu(M - L)i_{\text{f}} \end{split} \tag{B5}$$

非故障支路:

$$\begin{split} \Psi_{\rm c} &= Li_{\rm c} + (1-\mu)M(i_{\rm a} + i_{\rm b}) + \mu M[(i_{\rm a} - i_{\rm f}) + (i_{\rm b} + i_{\rm f})] \\ &= Mi_{\rm a} + Mi_{\rm b} + Li_{\rm c} \end{split} \tag{B6}$$

故障环:

$$\begin{split} \Psi_{\rm f} &= \mu^2 L[(i_{\rm f} - i_{\rm a}) + (i_{\rm b} + i_{\rm f})] - \mu(1 - \mu) L(i_{\rm a} - i_{\rm b}) - \mu^2 M[(i_{\rm f} - i_{\rm a}) + (i_{\rm b} + i_{\rm f})] + \mu(1 - \mu) M(i_{\rm a} - i_{\rm b}) \\ &= \mu(M - L)i_{\rm a} + \mu(L - M)i_{\rm b} + 2\mu^2(L - M)i_{\rm f} \end{split} \tag{B7}$$

对应式(13),相间短路下 $L_{abc.f}$ 表达式如式(B8)所示。

$$L_{abc,f} = \begin{bmatrix} L & M & M & \mu(M-L) \\ M & L & M & \mu(L-M) \\ M & M & L & 0 \\ \mu(M-L) & \mu(L-M) & 0 & 2\mu^{2}(L-M) \end{bmatrix}$$
(B8)

PMSG 相间短路故障两相旋转坐标系下数学模型推导如下:

(1)电压方程

对应式(20),相间短路下 $R_{dq0,f,d'q'}$ 表达式如式(B9)所示。

$$\mathbf{R}_{dq0,f,d'q'} = \mu R \begin{bmatrix} \frac{1}{\mu} & 0 & 0 & \frac{2}{3}A & 0 & 0\\ 0 & \frac{1}{\mu} & 0 & \frac{2}{3}B & 0 & 0\\ 0 & 0 & \frac{1}{\mu} & 0 & 0 & 0\\ A & B & 0 & 2 + \frac{R_g}{\mu R} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R_{d'}}{\mu R} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{R_{q'}}{\mu R} \end{bmatrix}$$
(B9)

其中,

$$\begin{cases} A = -\cos\theta + \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ B = \sin\theta - \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$
 (B10)

(2)磁链方程

同理,磁链方程式(13)两边同乘以 P_T 可得(注:此时 P_T 右下角为常数 1):

$$\Psi P \Psi = L_{T} \quad i_{abc,f} = I_{abc,f} \quad abc,f = I_{abc,f} \quad abc,$$

PMSG 完整数学模型中,相间短路故障对应的部分公式如下:对应式(27),相间短路下 $L_{dq0,f,d'q'}$ 和 W 表达式如式(B12)所示。

$$\begin{cases}
\vec{L}_{dq0,f,d'q'} = E \\
0 & 0 & 0 & \frac{2}{3}A & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 \\
-B & A & 0 & 0 \\
\hline
0 & 0 & 0 & \frac{2}{3}A & 0
\end{cases}$$

$$W = E \begin{bmatrix}
0 & \frac{L_q}{C} & 0 & \frac{2}{3}B & 0 & \frac{L_{aq'}}{C} \\
-\frac{L_d}{C} & 0 & 0 & -\frac{2}{3}A & \frac{-L_{ad'}}{C} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix}$$
(B12)

附录 C

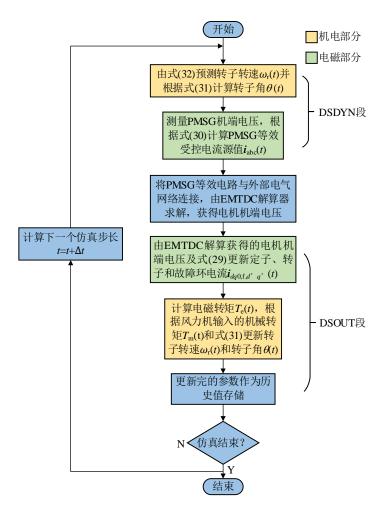


图 C1 PMSG 等效模型建模及解算流程

Fig.C1 Flowchartof PMSG equivalentmodelingandsolving

附录 D

表 D1 测试系统参数

Table D1 Parameters of test system

符号	参数	数值
$S_{ m bPMSG}$	额定容量/(MV·A)	2
$U_{ m bPMSG}$	额定电压/kV	0.69
$f_{ m bPMSG}$	额定频率/Hz	25
R	定子绕组电阻	0.0017
$L_{\rm s}$	定子漏抗	0.0364
L_d	d 轴电感	0.55
L_q	q 轴电感	1.11
$R_{d'}$	d 轴阻尼绕组电阻	0.055
$L_{d'}$	d 轴阻尼绕组电感	0.62
$R_{q'}$	q轴阻尼绕组电阻	0.183
$L_{q'}$	q轴阻尼绕组电感	1.175
$L_{\mathrm{a}d}$,	a 轴和 d 轴阻尼绕组互感	0.5136

$L_{\mathrm{a}q}$,	a 轴和 q 轴阻尼绕组互感	1.0736
$\Psi_{ m f}$	永磁体磁链	1
J	角转动惯量/s	4
K_{D}	机械阻尼系数	0.01
L	定子绕组自感	0.2
M	定子绕组互感	0.1
R_{EX}	x 外部系统等值阻抗/Ω	

注:未标注单位的参数为标幺值。

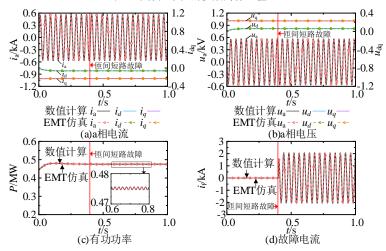


图 D1 相间短路故障下数值计算与 EMT 仿真结果

Fig.D1 Numerical calculation and EMT simulation results of PMSG interphasefaults

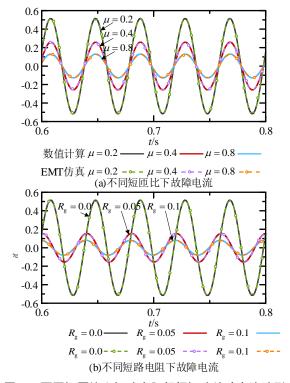


图 D2 不同短匝比和短路电阻相间短路故障电流波形

Fig.D2 Current waveforms of interphase short circuit fault under different short-turn ratio and short circuit resistance