

DOI: 10.7667/PSPC180283

计及撬棒电路的双馈风电机组二次骤升故障穿越特性分析

周步祥¹, 董申¹, 林楠², 刘舒畅¹, 袁俊忠³, 石敏⁴

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610045;
3. 国网海东市供电公司互助供电公司, 青海 海东 810500; 4. 国网南通市供电公司, 江苏 南通 226006)

摘要: 风电场在低电压故障穿越时, 由于系统保护设计不合理, 故障不能快速切除, 无功补偿控制策略存在问题或风机不具备高电压穿越能力, 导致低电压穿越故障发生之后出现骤升故障。针对这一工况, 在考虑了电网电压骤降恢复阶段的前提下, 计及了撬棒电路是否投入对双馈风电机组的影响。因此, 首先建立了考虑电压骤降恢复阶段和撬棒电路的暂态数学模型, 推导出未投入撬棒电路和投入撬棒电路两种情形下的定、转子电流表达式。然后详细分析了是否投入撬棒电路两种情形对二次骤升故障穿越特性的影响, 得到了撬棒电路的投入条件和最优的撬棒电阻投入阻值。最后通过仿真验证, 表明了推导的定转子电流表达式、投入条件及最优撬棒阻值的合理性, 同时也说明了暂态模型的正确性, 为分析二次骤升故障穿越特性提供了精确的模型。

关键词: DFIG; 骤升故障; 定子磁链自然分量; 撬棒电路; 投入条件; 最优撬棒阻值

Analysis of double-fed wind turbine's secondary high voltage ride-through characteristics considering the crowbar circuit

ZHOU Buxiang¹, DONG Shen¹, LIN Nan², LIU Shuchang¹, YUAN Junzhong³, SHI Min⁴

(1. School of Electrical and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610045, China; 3. State Grid Huzhu Electric Power Supply Company, Haidong 810500, China;
4. State Grid Nantong Power Supply Company, Nantong 226006, China)

Abstract: When a wind farm crosses a low-voltage fault, due to unreasonable system protection design, the fault cannot be quickly removed, there is a problem with reactive power compensation control strategy or the fan does not have high voltage ride-through capability, resulting in a sudden rise after a low voltage ride through fault. In this working condition, this paper considers whether the crowbar circuit will affect the double-fed wind turbine under the premise of taking into account the recovery stage of the voltage sag. Therefore, this paper first establishes a transient mathematical model that considers the voltage dip recovery phase and the crowbar circuit, and derives the stator and rotor current expressions for both the crowbar circuit and the input crowbar circuit. And then it analyzes two situations whether or not the crowbar circuit is put into have influence on the secondary voltage swell fault ride-through characteristics, and obtains the input condition of the crowbar circuit and the optimal input resistance of the crowbar resistance. Finally, simulation verification shows the rationality of derived stator and rotor currents expression, the input conditions and the optimal resistance of the crowbar and illustrates the correctness of the transient model, which can provide an accurate model for the analysis of the secondary catastrophic failure traversal characteristics.

Key words: DFIG; HVRT; stator flux linkage of natural components; crowbar circuit; input conditions; optimal crowbar resistance

0 引言

随着各国对清洁能源的重视, 风电随着技术的突破革新, 取得了令人瞩目的发展^[1-2]。在目前的风电工程实践中, 国内各地曾先后发生了多次由于电

压骤升故障导致的风机脱网事故^[3-5]。而这些事故都是先发生了电压骤降故障, 后引起电压骤升故障之后导致风电机组脱网。

目前对双馈风电机组电压单次骤升故障有很多的研究^[6-11]。文献[6]采用瞬态灭磁控制和无功电流

支持策略, 减少了定子磁链中的定子磁链直流、负序分量, 实现了双馈感应电机的高电压穿越。文献[7-8]采用改进的网侧控制策略应对骤升故障, 抑制了转子电流, 提高了高电压穿越能力; 文献[9-11]通过添加硬件, 如超级电容、静止无功补偿器来维持功率平衡, 稳定直流侧母线电压, 进而提升了高电压穿越能力。但是以上这些研究中采用的风电机组暂态模型只考虑到电压骤升这一单次故障, 没有考虑到实际工况中往往电网高电压故障在电网低电压故障恢复后发生, 因而目前双馈风电机组暂态模型并不精确。

在目前的研究中, 关于撬棒电路对双馈风电机组影响的研究十分普遍^[12-17]。文献[12-15]研究了三相短路下撬棒电路对双馈风电机组的影响, 推导出了该情形下含撬棒电路的短路电流表达式和实用表达式; 文献[16-17]在计及撬棒电路的前提下, 考虑了撬棒电路的动作时间以及不对称短路情形, 得到了短路电流表达式。但这些研究都是在低电压故障过程中进行的, 并没有考虑高电压穿越的情形。

基于以上所存在的问题, 本文在考虑骤升恢复阶段前提下, 建立计及撬棒电路的暂态数学模型, 详细分析了撬棒电路对二次骤升故障穿越性能的影响, 推导出撬棒电路是否运行两种情形下的定、转子表达式, 然后详细分析了两种情形下对二次骤升故障穿越特性的影响, 得到了撬棒电路的投入条件和最优的撬棒电阻投入阻值。本文成果为分析二次骤升故障穿越特性提供了精确的模型和定、转子电流表达式。

1 计及撬棒电路的双馈风电机组二次骤升故障模型

1.1 双馈风电机组骤升故障过程

在酒泉风电脱网事故、张家口风电脱网事故、华北某电网脱网事故^[3-5]等事件中可以看到, 电压骤升故障往往出现在低电压穿越故障之后, 在电网电压骤降恢复阶段, 由于系统无功过剩和部分风机不具备高压穿越能力而导致电网骤升故障, 双馈风电机组骤升故障过程中电网电压波形如图1所示。图1给出了电压骤降故障恢复后引起的电网电压骤升故障的电网连锁故障情况。电网故障发生在 t_0 时刻引起电压骤降, 骤降深度为 p , 电网电压骤降时通常会引起转子电流突升, 在满足条件(如转子电流达到稳态时的2倍)下转子侧会投入撬棒电路, 通常在电网骤降瞬间转子电流达到其最大值, 即 t_0 时刻转子侧撬棒电路开始投入, 当转子电流降到安全范围, 在 t_1 时刻将撬棒电路断开并且转子开始补无功, 双馈风

电机组将逐渐在低电压下运行进入稳态。在 t_2 时刻, 故障保护投入, 断路器动作, 电网电压开始恢复, 以三相短路故障为例, 如果考虑断路器实际运行情况, 三相短路故障会首先恢复为两相短路故障, 并且大约在10 ms后的 t_4 完全恢复^[18]。之后双馈风电机组将逐渐恢复输出有功并进入正常运行状态。由于发生低电压穿越故障后, 系统大量补充无功, 导致无功过剩, 在 t_4 时刻发生电压骤升故障, 骤升幅度为 m , 同样在满足撬棒电路投入条件时, 转子侧将投入撬棒电路, 若投入, 则 t_4 时刻投入, t_5 时刻切除。 t_6 时刻故障电压再次恢复。本文针对 $t_2 \sim t_6$ 时刻, 只讨论平衡电网故障情况。

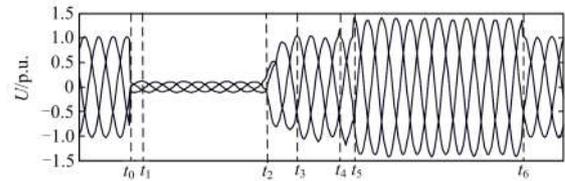


图1 电网电压骤升故障波形

Fig. 1 High voltage ride through waveform of grid voltage

1.2 双馈风电机组骤升故障过程

1) 第一次故障的电网电压骤降恢复阶段对模型的影响

不计磁饱和现象, 在定子坐标系为基础的空间矢量坐标系下双馈电机定、转子电压和磁链方程式为^[16]

$$u_s = i_s R_s + \frac{d\psi_s}{dt} \quad (1)$$

$$u_r = i_r R_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j\omega_r \psi_r \quad (2)$$

$$\psi_s = L_s i_s + L_m i_r \quad (3)$$

$$\psi_r = L_r i_r + L_m i_s \quad (4)$$

式中: L_m 为励磁电感; L_s 、 L_r 分别为定、转子全电感; i_s 、 i_r 、 ψ_s 、 ψ_r 分别为定、转子电流和磁链。

忽略定子电阻, 令正常定子电压为 U_s , 则由式(1)可得双馈风电机组正常运行时的定子总磁链(此时也是定子磁链强迫分量), 如式(5)所示。

$$\psi_s = \frac{U_s}{j\omega_0} e^{j\omega_0 t} \quad (5)$$

式中: U_s 为正常电网电压; ω_0 为电网角速度。

当发生电网电压骤降或者骤升时, 定子磁链将会分解为两部分: 一部分是以电网角速度旋转的稳态分量, 也称强迫分量 ψ_{sf} ; 另一部分是以定子时间常数进行衰减的自然分量 ψ_{sn} 。假设 $t = t_0$ 时刻发生电网电压骤降或骤升, 则自然分量如式(6)所示^[13,19]。

$$\psi_{sn}(t) = \psi_{sn}(t_0) e^{-\frac{t-t_0}{\tau_s}} \quad (6)$$

式中: $\psi_{sn}(t_0)$ 为 t_0 时刻自然分量的幅值; $\tau_s = \frac{L'_s}{R_s}$ 为

暂态定子时间常数, $L'_s = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_r}$ 。

若不考虑电压骤降恢复阶段, 即不考虑图1中的 t_3-t_4 时间段所产生的影响, 则由磁链守恒定律可知, 自然分量幅值为

$$\psi_{sn}(t_4) = \psi_s(t_4) - \psi_{sf}(t_4) = \frac{U_s}{j\omega_0} - \frac{(1+m)U_s}{j\omega_0} = \frac{-mU_s}{j\omega_0} \quad (7)$$

由上述案例和图1可知, 多数电压骤升故障是发生在电压骤降恢复阶段之后, 即 t_3 时刻之后。虽然此时电网电压已恢复正常, 但在 t_3 时刻之后定子磁链自然分量仍然存在, 这将直接影响到定子磁链的合成, 因此电压骤降恢复阶段必然会对电压骤升故障产生影响。

由式(6)、式(7)可知, 自然分量只与骤升幅度有关, 而考虑到电网电压骤降恢复阶段, 电压骤降幅度 p 、电网电压恢复正常到发生电压骤升故障的时间 T_r 、恢复时的电网故障角度 θ 等都会对磁链产生影响。考虑电网电压骤降恢复阶段的自然磁链关系式 $\psi_{sn}(t_4)$ 应如式(8)所示。下文将通过双馈风电机组的故障运行特性分析, 给出 $\psi_{sn}(t_4)$ 的具体解析式。

$$\psi_{sn}(t_4) = f(m, p, T_r, \theta, \dots) \quad (8)$$

2) 撬棒电路对模型的影响

当投入撬棒电路时, 双馈风电机组暂态模型等值电路将会变化, 如图2所示, 此时将会对暂态定、转子常数产生直接影响, 并且使转子侧短路, 导致转子侧电压为零。通过对等值电路进行计算, 得到投入撬棒电路后的暂态定、转子常数如下式^[20]。

$$\tau_{sc} = L'_s / \left(R_s + \frac{\omega_r^2 L'_r L_m}{R_c^2 + (\omega_r L'_r)^2} \right) \quad (9)$$

$$\tau_{sc} = L'_r / (R_r + R_c) \quad (10)$$

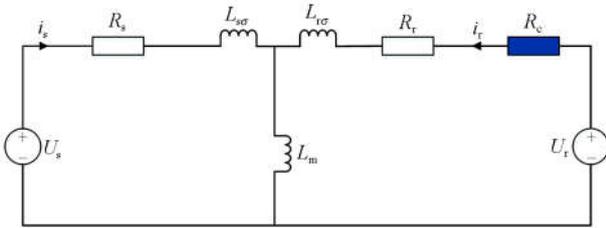


图2 双馈风电机组暂态模型等值电路

Fig. 2 Equivalent circuit of transient model of double-fed wind turbine

2 电网电压骤降恢复阶段对双馈风电机组二次骤升故障运行特性的影响

2.1 电网电压骤降恢复阶段的定子磁链

由上文可知, 电网电压在 t_2 时刻恢复时, 双馈风电机组已在低电压下工作在稳定状态, 此时只存在由剩余电网电压产生的强迫磁链, 如式(11)所示。

$$\psi_s(t_{2-}) = \frac{(1-p)U_s}{j\omega_0} e^{j\omega_0 t_2} \quad (11)$$

之后某相断路器将会在电流过零时先断开, 三相短路故障将会变为两相短路故障。故障开始恢复的相对时间可以由故障电压、电流之间的角度 θ 表示, 称为故障恢复角。此时 θ 满足以下关系^[21]:

$$\omega_0 t_2 = -\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) + 2n\pi, n \in N \quad (12)$$

θ 的大小主要与故障点和风力发电系统之间的线路阻抗有关, 通常情况下在分布系统中故障角度为 $45^\circ \sim 60^\circ$, 在传输系统中故障角为 $75^\circ \sim 85^\circ$ ^[4]。

由对称分量法可知, t_{2+} 时刻强迫磁链 $\psi_{sf}^s(t_{2+})$ 由正序分量、负序分量组成, 如式(13)所示。

$$\psi_{sf}^s(t_{2+}) = (1 - \frac{p}{2}) \frac{U_s}{j\omega_0} e^{-j(\frac{\pi}{2} - \theta)} - \frac{p}{2} \frac{U_s}{j\omega_0} e^{j(\frac{\pi}{2} - \theta)} \quad (13)$$

由于 t_2 磁链不能突变 ($\psi_s(t_{2+}) = \psi_s(t_{2-})$), 所以可知自由磁链 $\psi_{sn}(t_{2+})$ 。

$$\psi_{sn}(t_2) = \psi_s(t_{2+}) - \psi_{sf}^s(t_{2+}) = \frac{pU_s}{\omega_0} \cos\theta \quad (14)$$

大约 5 ms 后, 强制磁链正序分量、负序分量大约旋转 90° 到达 t_3 时刻, 此时剩余两相恢复, 电网电压恢复正常。由于矢量控制下 τ_s 常数较大 (1 s 左右), 且衰减时间短暂, 因此 $\psi_{sn}(t_3)$ 可以忽略衰减影响。 $\psi_s(t_{3+})$ 如式(15)所示。

$$\psi_s(t_{3+}) = (1 - \frac{p}{2}) \frac{U_s}{j\omega_0} e^{j\theta} - \frac{p}{2} \frac{U_s}{j\omega_0} e^{-j\theta} + \frac{pU_s}{\omega_0} \cos\theta \quad (15)$$

在 t_{3+} 时刻, 电网电压恢复正常, $\psi_{sf}^s(t_{3+})$ 如式(16)所示。

$$\psi_{sf}^s(t_{3+}) = \frac{U_s}{j\omega_0} e^{j\theta} \quad (16)$$

由于 t_3 时刻磁链不能突变 ($\psi_s(t_{3+}) = \psi_s(t_{3-})$), 可知自由磁链 $\psi_{sn}(t_3)$ 。

$$\psi_{sn}(t_3) = \psi_s(t_{3+}) - \psi_{sf}^s(t_{3+}) = \frac{\sqrt{2}pU_s}{\omega_0} \cos\theta e^{j\frac{\pi}{4}} \quad (17)$$

在电压骤降恢复正常到发生电压骤升故障时 ($t_3 \sim t_4$), $\psi_{sn}(t_3)$ 为初始磁链, 自由磁链 $\psi_{sn}(t)$ 由式(6)和式(18)可知。

$$\psi_{sn}(t) = \psi_{sn}(t_3) e^{-\frac{t-t_3}{\tau_s}} = \frac{\sqrt{2}pU_s}{\omega_0} \cos\theta e^{\frac{\pi}{4}} e^{-\frac{t-t_3}{\tau_s}} \quad (18)$$

强制磁链 $\psi_{sf}(t)$ 如式(19)所示。

$$\psi_{sf}(t) = \psi_{sf}(t_{3+}) e^{j\omega_0(t-t_3)} = \frac{U_s}{j\omega_0} e^{j[\omega_0(t-t_3)+\theta]} \quad (19)$$

在发生电压骤升故障之前 t_{4-} 时刻, 定子总磁链如式(20)所示。

$$\begin{aligned} \psi_s(t_{4-}) &= \psi_{sf}(t_{4-}) + \psi_{sn}(t_{4-}) = \\ &= \frac{U_s}{j\omega_0} e^{j(\omega_0 T_r + \theta)} + \frac{\sqrt{2}pU_s}{\omega_0} \cos\theta e^{\frac{\pi}{4}} e^{-\frac{T_r}{\tau_s}} \end{aligned} \quad (20)$$

式中, $T_r = t_4 - t_3$ 为电压骤降恢复正常到发生电压骤升故障时的间隔时间。

2.2 电网电压骤降恢复阶段的定子磁链

由于 $L_r = L_m + L_{lr}$ 、 $L_s = L_m + L_{ls}$, 而 $L_m \gg L_{lr}$ 、 $L_m \gg L_{ls}$, 所以 $L_m \approx L_r \approx L_s$ 。式(3)与式(4)联立可得

$$i_r = \frac{1}{L'_r} (\psi_r - \psi_s) \quad (21)$$

$$i_s = \frac{1}{L'_s} (\psi_s - \psi_r) \quad (22)$$

式中, $L'_r = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s}$ 。

联立式(21)和式(22), 将 i_s 由 i_r 表示, 可得

$$i_s = -k i_r \quad (23)$$

式中, $k = \frac{L'_r}{L'_s}$ 。将式(21)代入式(2)可得 ψ_r 的表达式。

$$\frac{d\psi_r(t)}{dt} + \left(\frac{R_r}{L'_r} - j\omega_r \right) \psi_r(t) = u_r(t_{3+}) + \frac{1}{\tau_r} \psi_s(t) \quad (24)$$

该微分方程初始条件为

$$\begin{cases} u_r(t_{3+}) = \frac{R_r - j\omega_r L_r}{L_m} \psi_s(t_{3+}) - \\ \quad \frac{R_r L_s - j\omega_r (L_s L_r - L_m^2)}{L_m} I_s(t_{3+}) \\ \psi_r(t_{3+}) = \frac{L_r}{L_m} \psi_s(t_{3+}) - \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_m L_s} i_s(t_{3+}) \end{cases} \quad (25)$$

忽略转子电阻, 考虑到 $L_m \approx L_r \approx L_s$ 这一条件, 该微分方程初始条件为

$$\begin{cases} u_r(t_{3+}) \approx -j\omega_r \psi_s(t_{3+}) \\ \psi_r(t_{3+}) \approx \psi_s(t_{3+}) \end{cases} \quad (26)$$

由式(24)和式(26)解得, 恢复阶段的 $\psi_r(t)$ 如下。

$$\psi_r(t) = \frac{u_r(t_{3+})}{-j\omega_r} + M\psi_{sn}(t_3) e^{-\frac{t-t_3}{\tau_s}} + N\psi_{sf}(t_3) e^{j\omega_0(t-t_3)} + C_1 e^{-\frac{1}{\tau_r} j\omega_r(t-t_3)} \quad (27)$$

式中: $M = \frac{1}{1 - j\omega_r \tau_r}$; $N = \frac{1}{1 - j\omega_r \tau_r} \left(1 - \frac{\omega_0}{\omega_0 - \omega_r} \right)$;

$$C_1 = \psi_s(t_3) - M\psi_{sn}(t_3) - N\psi_{sf}(t_3) + \frac{u_r(t_3)}{j\omega_r}。$$

所以, $\psi_r(t_{4-})$ 如式(28)所示。

$$\begin{aligned} \psi_r(t_{4-}) &= \frac{u_r(t_{3+})}{-j\omega_r} + M\psi_{sn}(t_3) e^{-\frac{T_r}{\tau_s}} + \\ &= N\psi_{sf}(t_3) e^{j\omega_0 T_r} + C_1 e^{-\frac{T_r}{\tau_r}} e^{j\omega_r T_r} \end{aligned} \quad (28)$$

2.3 发生二次故障后的定子自然磁链及定子磁链

t_4 时刻发生骤升故障, 由式(5)可知, 此时 $\psi_{sf}(t_{4+})$ 如式(29)。

$$\psi_{sf}(t_{4+}) = \frac{(1+m)U_s}{j\omega_0} e^{j\omega_0 t_4} = \frac{(1+m)U_s}{j\omega_0} e^{j(\omega_0 T_r + \theta)} \quad (29)$$

由于 t_4 时刻磁链不能突变 ($\psi_s(t_{4+}) = \psi_s(t_{4-})$), 所以可求得式(8)的具体解析式如式(30)。

$$\begin{aligned} \psi_{sn}(t_{4+}) &= \psi_s(t_{4+}) - \psi_{sf}(t_{4+}) = \frac{U_s}{j\omega_0} e^{j(\omega_0 T_r + \theta)} + \\ &= \frac{\sqrt{2}pU_s}{\omega_0} \cos\theta e^{\frac{\pi}{4}} e^{-\frac{T_r}{\tau_s}} - \frac{(1+m)U_s}{j\omega_0} e^{j(\omega_0 T_r + \theta)} = \\ &= \frac{U_s}{\omega_0} \left(\sqrt{2}p \cos\theta e^{\frac{\pi}{4}} e^{-\frac{T_r}{\tau_s}} + m e^{j(\omega_0 T_r + \theta + \frac{\pi}{2})} \right) \end{aligned} \quad (30)$$

由上式可知, 考虑电压恢复阶段的定子磁链自然分量由两部分组成: 第一部分由电压恢复阶段的自由磁链决定; 第二部分由电压骤升阶段的强制磁链决定。当 $\omega_0 T_r + \theta + \frac{\pi}{4} = 2k\pi$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) 时, 初始自由磁链取得最大值。

当不考虑电网电压骤降恢复阶段的影响时, 骤升故障中的定子磁链自然分量如式(7)所示。当考虑到电网电压骤降恢复阶段的影响时, 骤升故障中的定子磁链自然分量如式(30)所示。两者差值如式(31)所示。

$$\begin{aligned} \Delta\psi_{sn} &= \frac{U_s}{j\omega_0} + \frac{\sqrt{2}pU_s}{\omega_0} \cos\theta e^{-\frac{T_r}{\tau_s}} - \frac{(1+m)U_s}{j\omega_0} - \frac{-mU_s}{j\omega_0} = \\ &= \frac{\sqrt{2}pU_s}{\omega_0} \cos\theta e^{-\frac{T_r}{\tau_s}} \end{aligned} \quad (31)$$

由式(31)可以看出, 考虑骤降恢复阶段影响时, 骤升故障的定子磁链自然分量将会显著增加, 进而使转子电流和定子电流增大。

由式(29)和式(30)可得, 发生二次骤升故障后的

定子磁链如式(32)。

$$\psi_s(t) = \psi_{sf}(t_{4+})e^{j\omega_0(t-t_4)} + \psi_{sn}(t_{4+})e^{-\frac{t-t_4}{\tau_s}} \quad (32)$$

由于本文主要研究撬棒电路对双馈风电机组二次骤升故障的影响,因此采取控制变量法,取最严重故障下故障参数的实际常发生值,以撬棒电阻和骤升幅度为变量,量化撬棒电路对二次骤升故障的影响。由文献[3-5]可知,第一次骤降幅度大部分处在0.5~0.8 s之间,两次故障时间间隔在0.5~2 s之间,因此,本文取最严重的情况,即: $p=0.8$, $T_r=0.5$ s。

3 撬棒电路对双馈风电机组二次骤升故障运行特性的影响分析

3.1 二次骤升故障后撬棒电路不动作

在 t_4 以后,当转子电流未达到2 p.u.时,此时撬棒电路不动作,转子侧不会被短路,同时转子常数和定子常数也不会发生改变。

由式(24)可知, $\psi_r(t)$ 的表达式为

$$\frac{d\psi_r(t)}{dt} + \left(\frac{R_r}{L'_r} - j\omega_r\right)\psi_r(t) = u_r(t_{4+}) + \frac{1}{\tau_r}\psi_s(t) \quad (33)$$

由于 t_4 时刻磁链不能突变,所以该一阶微分方程初始条件如式(34)所示。

$$\begin{cases} u_r(t_{4+}) = -j\omega_r\psi_s(t_{4+}) \\ \psi_r(t_{4+}) = \psi_r(t_{4-}) \end{cases} \quad (34)$$

解得二次骤升故障后的转子磁链为

$$\psi_r(t) = \frac{u_r(t_{4+})}{-j\omega_r} + M\psi_{sn}(t_{4+})e^{-\frac{t-t_4}{\tau_s}} + N\psi_{sf}(t_{4+})e^{j\omega_0(t-t_4)} + C_2e^{-\frac{t-t_4}{\tau_r}}e^{j\omega_r(t-t_4)} \quad (35)$$

式中, $C_2 = \psi_r(t_{4-}) - M\psi_{sn}(t_{4+}) - N\psi_{sf}(t_{4+}) + \frac{u_r(t_{4+})}{j\omega_r}$ 。

将式(32)和式(35)代入式(21)可得二次骤升故障后的转子电流为

$$i_r = \frac{1}{L'_r} \left[(M-1)\psi_{sn}(t_{4+})e^{-\frac{t-t_4}{\tau_{sc}}} + (N-1)\psi_{sf}(t_{4+})e^{j\omega_0(t-t_4)} - \frac{u_r(t_{4+})}{j\omega_r} + C_2e^{-\frac{t-t_4}{\tau_r}}e^{j\omega_r(t-t_4)} \right] \quad (36)$$

可知,当 $t=t_4$ 且满足 $\omega_0 T_r + \theta + \frac{\pi}{4} = 2k\pi$, ($k=0,1,2,\dots$) 时,转子电流具有最大值 I_{rm} ,将 C_2 和定值参数代入式(36)可得式(37)。

$$I_{rm} = \frac{U_s}{L'_r\omega_0} \left[(e^{-\frac{1}{2\tau_s}} - 1)(0.4\sqrt{2}e^{-\frac{1}{2\tau_s}} + m) + (e^{\frac{j\omega_0}{2}} - 1)(1+m) \right] \quad (37)$$

由式(23)和式(36)可得二次骤升故障后的定子电流为

$$i_s = -ki_r \quad (38)$$

由式(23)和式(37)可得定子电流最大值 I_{sm} 。

$$I_{sm} = -kI_{rm} \quad (39)$$

由式(39)可以看出,在故障期间定子电流和转子电流方向相反,具有相同的变化规律,定子电流随着转子电流的增大而增大,并且两者最大值都在相同时刻取得。

3.2 二次骤升故障后撬棒电路动作

在 t_4 以后,当转子电流达到2 p.u.后,撬棒电路动作,转子侧被短路, $u_r(t_{4+})=0$,同时撬棒电阻为 R_c ,此时的定子常数和转子常数将改变为式(9)、式(10)所示参数。因为 $R_c + R_r \gg L'_r$, $\psi_r(t)$ 表达式的最后一项 $C_2e^{-\frac{t-t_4}{\tau_{rc}}}e^{j\omega_r(t-t_4)}$ 在几毫秒内迅速减小且 C_2 值较小,忽略该项,得到二次骤升故障后转子磁链 $\psi_{rc}(t)$ 表达式如式(40)。

$$\psi_{rc}(t) = M_1\psi_{sn}(t_{4+})e^{-\frac{t-t_4}{\tau_{sc}}} + N_1\psi_{sf}(t_{4+})e^{j\omega_0(t-t_4)} \quad (40)$$

式中: $M_1 = \frac{1}{1-j\omega_r\tau_{rc}}$; $N_1 = \frac{1}{1-j\omega_r\tau_{rc}}(1 - \frac{\omega_0}{\omega_0 - \omega_r})$ 。

将式(32)和式(40)代入式(21)可得骤升故障阶段转子电流为

$$i_{rc} = \frac{1}{L'_r} \left[(M_1-1)\psi_{sn}(t_{4+})e^{-\frac{t-t_4}{\tau_{sc}}} + (N_1-1)\psi_{sf}(t_{4+})e^{j\omega_0(t-t_4)} \right] \quad (41)$$

可知,当 $t=t_4$ 且满足 $\omega_0 T_r + \theta + \frac{\pi}{4} = 2k\pi$, ($k=0,1,2,\dots$) 时,转子电流具有最大值,代入定值参数得 I_{rcm} 为

$$I_{rcm} = \frac{U_s}{L'_r\omega_0} \left[\frac{1}{\sqrt{1+(\omega_0\tau_{rc})^2}} - 1)(0.4\sqrt{2}e^{-\frac{1}{2\tau_s}} + m) + \frac{1}{\sqrt{1+(\omega_0\tau_{rc})^2}}(1 - \frac{\omega_0}{\omega_0 - \omega_r})(1+m) \right] \quad (42)$$

由式(42)可知,当撬棒电路动作时,转子电流最大值受电网电压骤升幅度 m 和转子暂态常数 τ_{rc} 影响。

同理可得二次骤升故障后的定子电流 I_{sc} 和定

子电流最大值 I_{rcm} 。

3.3 撬棒电路运行条件

1) 撬棒电路投入条件

撬棒电路是否动作, 主要由转子电流是否达到 2 p.u. 决定, 但实际上对转子电流的测量比较繁琐, 不能快速判断是否达到 2 p.u.^[22]。因此, 本节用上文得到的 I_{rm} , 在其基础上, 转化为用骤升幅度 m 来判断系统是否投入撬棒电路, 判断如下。

$$\frac{U_s}{L'_i \omega_0} \left[(e^{\frac{1}{2\tau_c}} - 1)(0.4\sqrt{2}e^{-\frac{1}{2\tau_c}} + m) + (e^{\frac{j\omega_0}{2}} - 1)(1 + m) \right] > 2 \quad (43)$$

解得 $m > 0.12$, 所以当 $m > 0.12$ 时, 撬棒电路将动作, 投入电路。

2) 撬棒电路取值

当满足式(43)条件时, 撬棒电路将投入电路, 此时投入的电阻值为多少时才能达到最优效果, 必须满足的条件如下: 一是转子电流必须小于 2 p.u.; 二是在最严重的骤升故障中依然能使转子电流小于 2 p.u.; 三是能使故障状态时间尽可能地减小, 即转子暂态常数要尽可能地小; 四是取最严重情况下的故障参数, 计算 R_c 的值, 即在最严重状态下也能满足转子电流小于 2 p.u. 的效果。

$$\begin{cases} I_{rcm}(R_c) < 2 \text{ p.u.} \\ I_{rcm}(m=0.3) < 2 \text{ p.u.} \\ \min(\tau_{rc}) \end{cases} \quad (44)$$

由上述约束条件可得撬棒电阻 R_c 的最优值约为 0.45 p.u.。

4 仿真分析

本节利用 PSCAD 对 DFIG 的暂态过程进行仿真。采用表 1 所示的双馈风电机组参数, 故障前后风速不变, 均为 8 m/s, 各故障参数仍使用前文的默认参数, 骤升幅度 $m = 0.2$ p.u. 为默认参数。 $t = 2.7$ s 时发生三相对称故障。

表 1 DFIG 基本参数

Table 1 Basic parameters of DFIG

参数	数值
额定功率 P_n	1
额定电压 U_n	690
系统频率 f	60 Hz
转子自感 L_r	3.176 p.u.
定子自感 L_s	3.161 p.u.
定子侧电阻 R_s	0.002 5 p.u.
转子侧电阻 R_r	0.001 9 p.u.
撬棒电阻 R_c	0.45 p.u.
转子转速 ω_r	1.13 p.u.

图 3 为不同撬棒电阻取值下的转子电流图。由图 3 可以看出, 以 $R_c = 0.45$ p.u. 为中心, 随着 R_c 的值减小或增大, 转子电流波动明显变大, 在 2.85 s 时转子电流还未趋于稳定, 并且转子电流最大值也在增大, 由表 2 可知, 在 $R_c = 0.45$ p.u. 时, 转子电流幅值最小为 1.8 p.u., 而当 R_c 分别为 0.4 p.u.、0.5 p.u. 时, 转子电流幅值分别为 1.92 p.u. 和 1.89 p.u.。同时可以看出, 当 $R_c = 0.45$ p.u. 时, 转子电流波动时间最短, 在 2.8 s 时转子电流趋于稳定。由此说明, 当 $R_c = 0.45$ p.u. 时, 转子电流能最快趋于稳定并且幅值最小, 同时验证了上述理论计算撬棒电阻值的准确性。

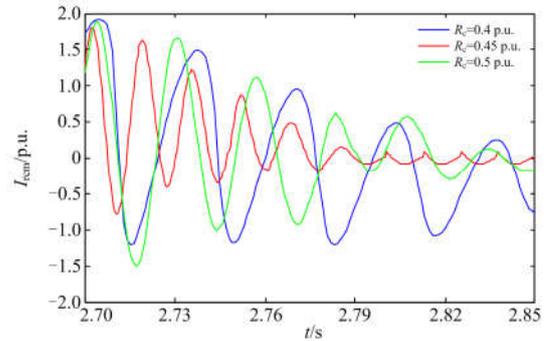


图 3 不同撬棒电阻取值下的转子电流

Fig. 3 Rotor current under different values of crowbar resistance

图 4 为撬棒电路不动作时不同骤升幅度下的转子电流图。由图 4 可以看出, 随着骤升幅度的增加, 转子电流的幅值随之增大。由表 2 可知, 转子电流最大值分别为 1.86 p.u.、2.02 p.u.、2.21 p.u.。由上述理论计算可得, 当 $m = 0.12$ p.u. 时, 转子电流达到 2 p.u.。由仿真图可知, 当 $m = 0.12$ p.u. 时, 转子电流达到 2.02 p.u., 说明理论计算较为准确。同时由仿真图可知, 当撬棒电路不动作时, 骤升故障发生 0.15 s 后转

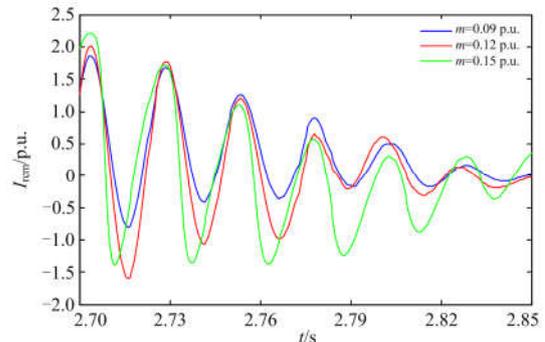


图 4 撬棒电路不动作时不同骤升幅度下的转子电流

Fig. 4 Rotor current at different high voltage ride through amplitudes when the crowbar circuit is not operating

子电流的波动幅度依然较大，而撬棒电路动作并且选择合适的撬棒电阻时，故障持续时间为0.1 s，由此说明了增加撬棒电路能缩小故障持续时间。

表 2 各类型转子电流最大值的比较

Table 2 Comparison of different types of rotor current maximum

短路电流	最大值
$R_c=0.4$	1.92
$R_c=0.45$	1.8
$R_c=0.5$	1.89
$m=0.09$	1.86
$m=0.12$	2.02
$m=0.15$	2.21

5 结论

本文从骤升故障穿越实际工况出发，在考虑了电网电压骤降恢复阶段的前提下，计及了撬棒电路是否投入对双馈风电机组二次骤升故障穿越特性的影响，建立了计及该影响的暂态数学模型。详细论证了撬棒电路动作与不动作两种情形下各故障参数对二次骤升故障穿越性能的影响。通过仿真分析，证明了本文推导的两种情形下定、转子电流表达式具有较好的准确性，同时确定了撬棒电路的投入条件和最优撬棒阻值。论文成果说明，本文提出的计算公式和暂态模型较为精确，投入条件和最优撬棒阻值合理可行，对风电场运行特性分析有重要的意义。

参考文献

[1] LU Z Y, LI W H, XIE B C, et al. Study on China's wind power development path-based on the target for 2030[J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2015, 51(11): 197-208.

[2] SUN S, LIU F, XUE S, et al. Review on wind power development in China: current situation and improvement strategies to realize future development[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 45(5): 589-599.

[3] 赵宏博, 姚良忠, 王伟胜, 等. 大规模风电高压脱网分析及协调预防控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 44-48, 65.

ZHAO Hongbo, YAO Liangzhong, WANG Weisheng, et al. An optimal look-ahead control strategy for hybrid energy storage system based on wind power prediction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 44-48, 65.

[4] 马伟娜, 姚万业, 白恺. 风力发电机组高电压穿越技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(8): 71-76.

MA Weina, YAO Wanye, BAI Kai. Studies on high voltage ride through technologies in wind turbines[J].

Power System and Clean Energy, 2014, 30(8): 71-76.

[5] 李少林, 王伟胜, 王瑞明, 等. 双馈风电机组高电压穿越控制策略与试验[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 76-82.

LI Shaolin, WANG Weisheng, WANG Ruiming, et al. Control strategy and experiment of high voltage ride through for DFIG-based wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 76-82.

[6] 白恺, 宋鹏, 徐海亮, 等. 双馈风电机组的高电压穿越控制策略[J]. 可再生能源, 2016, 34(1): 21-29.

BAI Kai, SONG Peng, XU Hailiang, et al. A high voltage ride-through control strategy for DFIG-based wind turbines[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(1): 21-29.

[7] 姜惠兰, 李天鹏, 吴玉璋. 双馈风力发电机的综合低电压穿越策略[J]. 高电压技术, 2017, 43(6): 2062-2068.

JIANG Huilan, LI Tianpeng, WU Yuzhang. Integrated strategy for low voltage ride through of doubly-fed induction generator[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(6): 2062-2068.

[8] 罗少杰, 朱玲. 电网电压骤升情况下双馈变流器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 123-129.

LUO Shaojie, ZHU Ling. Research on control strategy of double feed converter under grid voltage soared[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 123-129.

[9] 王利猛, 乔黎明, 刘久成. 应用超级电容提高风电机组故障穿越能力研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(24): 35-39.

WANG Limeng, QIAO Liming, LIU Jiucheng. Research on super capacitor for improving ability of FRT of wind turbine[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(24): 35-39.

[10] 刘诗涵, 周羽生, 许振华, 等. 基于超级电容蓄能的永磁同步海上风电低电压穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 9-15.

LIU Shihan, ZHOU Yusheng, XU Zhenhua, et al. Research on low-voltage ride through capability of permanent magnetic synchronous offshore wind power based on super-capacitor energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 9-15.

[11] 唐亦敏. 基于静止无功补偿器的风电场高电压穿越研究[J]. 电气传动, 2017, 47(10): 54-58.

TANG Yimin. Study for the high-voltage-ride-through of wind farms based on STATCOM[J]. Electric Drive, 2017, 47(10): 54-58.

[12] 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.
- [13] 杨刚, 潘文霞, 刘明洋, 等. 考虑 Crowbar 电阻的双馈电机短路电流实用计算[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2075-2080.
- YANG Gang, PAN Wenxia, LIU Mingyang, et al. Practical calculation of short-circuit current of DFIG considering crowbar resistance[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2075-2080.
- [14] 徐玉琴, 曹璐璐. 双馈感应发电机暂态特性分析及 Crowbar 阻值优化[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 93-100.
- XU Yuqin, CAO Lulu. Transient characteristics analysis of doubly fed induction generator and resistance optimization of Crowbar circuit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(4): 93-100.
- [15] 欧阳金鑫, 唐挺, 郑迪, 等. 低电压穿越控制下双馈风电机组短路电流特性与计算方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 222-230.
- OUYANG Jinxin, TANG Ting, ZHENG Di, et al. Characteristics and calculation method of short-circuit current of doubly fed wind generator under lower voltage ride through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 222-230.
- [16] 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.
- [17] 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): 7-12.
- ZHENG Tao, WEI Zhanpeng, LI Juan, et al. Unsymmetrical short circuit current analysis of doubly fed induction generators with crowbar protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 7-12.
- [18] LOPEZ J, SANCHIS P, ROBOAM X, et al. Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(3): 709-717.
- [19] 邢鲁华, 陈青, 吴长静, 等. 含双馈风电机组的电力系统短路电流实用计算方法[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1121-1127.
- XING Luhua, CHEN Qing, WU Changjing, et al. A practical method to calculate short-circuit current in power system connected with doubly fed induction generators[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1121-1127.
- [20] 李厚涛. 电网电压骤升下双馈发电机的机理分析及其控制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- LI Houtao. Mechanism analysis and control strategy on high voltage ride through of DFIG for wind power generation[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [21] CHEN W, BLAABJERG F, ZHU N, et al. Doubly fed induction generator wind turbine systems subject to recurring symmetrical grid faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(2): 1143-1160.
- [22] 熊小伏, 欧阳金鑫. 电网短路时双馈感应发电机转子电流的分析与计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 114-121.
- XIONG Xiaofu, OUYANG Jinxin. Analysis and calculation of rotor currents for doubly-fed induction generators under short circuits in power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 114-121.

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-05-17

作者简介:

周步祥(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统电网规划、调度自动化及计算机信息处理。E-mail: hiway_scu@126.com

(编辑 姜新丽)