

DOI: 10.7667/PSPC171324

适用于继电保护整定计算的双馈风电机等效模型

徐岩, 申南轩, 朱晓荣, 韩丹慧

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北保定 071003)

摘要: 随着双馈风电机并网容量的不断增加, 风电机组的接入对电网继电保护的影响逐渐增强, 研究适用于继电保护整定计算的双馈风电机短路电流计算方法尤为重要。为了解决这一问题, 并考虑到继电保护整定计算的实用性, 建立了一种适用于继电保护整定计算的双馈风电机等效模型。通过对双馈风电机基本关系式的推导, 得到了双馈风电机组的简化等效电路。通过对简化等效电路以及双馈风电机发生短路故障时的暂态过程进行研究, 推导出等效电动势的表达式, 并进一步推导出了双馈风电机组的短路电流计算公式。最后通过仿真验证了等效电路和短路电流计算公式的准确性, 为双馈风电机组的继电保护整定计算提供了一种新的等效模型。

关键词: 双馈风电机; 撬棒保护; 低电压穿越; 等效电路; 短路电流

Equivalent model of DFIG for relay protection setting calculation

XU Yan, SHEN Nanxuan, ZHU Xiaorong, HAN Danhui

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
(North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

Abstract: With the increase of DFIG capacity and the influence that the wind turbine to power grid relay protection gradually increased, the research which applies to relay protection of DFIG setting short-circuit current calculation method is particularly important. In order to solve this problem and consider the practicability of setting calculation of relay protection, this paper establishes a protection setting calculation of DFIG equivalent model for the relay. Through the derivation of the doubly fed wind turbine basic formula, the simplified equivalent circuit of DFIG is got. By studying the simplified equivalent circuit and the transient process of DFIG with short circuit fault, the expression of equivalent electromotive force is derived, and the formula of short circuit current of DFIG is derived. Finally, the accuracy of equivalent circuit and short-circuit current calculation formula is verified by simulation. It provides a new equivalent model for relay protection calculation of DFIG.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050101).

Key words: DFIG; crowbar protection; low voltage ride through; equivalent circuit; short-circuit current

0 引言

最近几年风力发电迅速发展, 我国已经成为全世界风电装机容量最大的国家, 在东北和西北地区风电大量接入电网后, 风电对电网的影响变得越来越大, 其中对继电保护整定计算的影响尤为突出。由于在风电场实际运行过程中, 曾多次出现低电压脱网事故, 为此双馈风电机大多配置了相应的低电压穿越控制策略。一般在故障初期, 由于短路电

流较大, 转子侧会投入撬棒保护装置, 此时由于撬棒电阻的作用会使得短路电流快速衰减。当短路电流衰减到一定范围内, 撬棒保护会退出, 风机恢复到双馈状态, 并执行低电压穿越时的控制策略, 在经过一个控制响应阶段后进入稳态阶段^[1-4]。

当前, 国内学者对双馈风电机组的短路电流进行了大量的研究, 文献[5]计算了撬棒电阻投入以后的定子短路电流; 文献[6]提出了运用堵转电流和转子额定电流计算定子短路电流的计算方法, 实现了实用计算, 但是仅仅是计算出了撬棒电阻投入以后的定子短路电流。文献[7]计算了短路电流的最大值并推导了周期分量有效值的表达式, 也分析了撬棒电

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)
(2015AA050101)

阻阻值对短路电流的影响。文献[8]研究了未忽略定子电阻和定转子磁链耦合的不对称故障短路电流。文献[9]分析了实际风电机组短路时的电流特性,但是依然运用原有的异步电机短路电流计算公式。文献[10]提出了一种基于等效电压源模型下的双馈风电机定转子短路电流表达式。

以上文献大多从基本公式出发,研究了撬棒电阻投入后以及固定控制策略情况下的短路电流表达式,并没有着重分析双馈风电机组故障时的等效电路。为了得到适用于继电保护整定计算的等效电路,本文从双馈风电机组基本关系式出发,得到双馈风电机组的简化等效电路,通过分析风电机组在故障时不同情况下的控制策略,计算出撬棒电阻投入后以及低电压穿越状态下的等效电动势,根据等效电动势以及等效电路,进一步得出短路电流表达式,最后通过仿真验证了等效电路的正确性。

1 双馈风电机组等效电路

转子侧含撬棒电阻装置的双馈风电机组拓扑结构如图1所示,定子侧经变压器直接与电网相连,转子侧通过背靠背的功率变换器与电网相连^[11]。

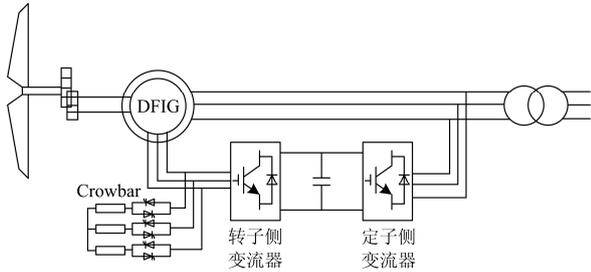


图1 双馈风电机组拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of DFIG

当电网发生短路故障时,双馈风电机组馈出的短路电流由定子输出的短路电流和功率变流器输出的短路电流组成,由于功率变流器无论在撬棒电阻投入或双馈控制状态下提供的短路电流都很小,因此忽略功率变流器输出的短路电流,用双馈风电机组定子侧馈出的短路电流代替双馈风电机组馈出的短路电流。

当定子和转子侧均采用电动机惯例,忽略磁饱和现象,转速在暂态过程中不变时,双馈风电机组在同步旋转坐标系下的电压、磁链方程^[12-13]如式(1)一式(4)所示。

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

$$u_r = R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j\omega_{s-r} \psi_r \quad (2)$$

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

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

式中: u 、 i 、 ψ 、 L 、 R 分别表示电压、电流、磁链、电感和电阻;下标 s 、 r 分别表示定子绕组和转子绕组; $L_s = L_{s\sigma} + L_m$ 、 $L_r = L_{r\sigma} + L_m$, $L_{s\sigma}$ 、 $L_{r\sigma}$ 分别代表定子漏感和转子漏感; L_m 表示激磁电感; ω_s 表示同步角速度; ω_{s-r} 表示转差角速度。

根据式(1)一式(4),可得双馈风电机组等效电路,如图2所示。

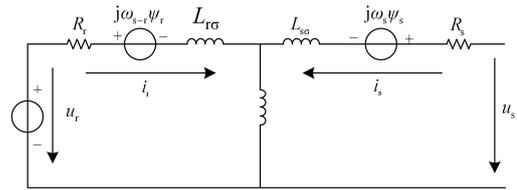


图2 双馈风电机组等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of DFIG

将式(4)代入式(3),消去转子电流得到定子磁链表达式。

$$\psi_s = L_s i_s + L_m \frac{\psi_r - L_m i_s}{L_r} \quad (5)$$

将式(5)代入式(1)中可得

$$u_s = \left[R_s + j\omega_s \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \right] i_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_s \frac{L_m}{L_r} \psi_r \quad (6)$$

假设等效电动势 E 为

$$E = \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_s \frac{L_m}{L_r} \psi_r \quad (7)$$

并且假设定子等效电感 $L'_s = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$,基于以上

假设,对式(6)进行简化,从而可以得到双馈风电机组在电网故障时的简化等效电路,如图3所示。

由图3可得双馈风电机组馈出的短路电流 i_s ,其表达式为

$$i_s = \frac{u_s - E}{R_s + X'_s} \quad (8)$$

式中, $X'_s = j\omega_s L'_s$ 。

根据式(8)可知,假设双馈风电机组机端电压跌落深度和等效阻抗在电网发生故障时不发生变化,则等效电动势的大小决定了短路电流的大小。

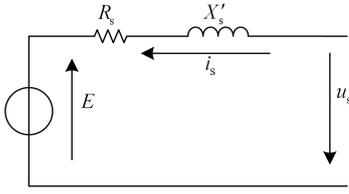


图3 简化后的双馈风电机组等效电路

Fig. 3 Simplified equivalent circuit of DFIG

2 故障时双馈风电机组等效电动势的计算方法

2.1 撬棒电阻投入后的等效电动势

由式(7)可知,等效电动势由定子磁链和转子磁链决定,故障期间定子、转子磁链变化,使得等效电动势发生变化,进而产生不同的短路电流。故障初期由于转子侧短路电流较大,为了保护变流器,双馈风电机组会投入撬棒保护,此时功率变流器将退出运行。

电网发生三相短路故障时,双馈风电机组机端电压为

$$u_s = \begin{cases} U_s e^{i\varphi} \\ kU_s e^{i\varphi} \end{cases} \quad (9)$$

式中, k 为电压跌落百分比。

根据式(1)可知,忽略定子电阻,可得故障初始时刻双馈风电机组定子磁链表达式为

$$\psi_s(0_+) = \frac{u_s}{j\omega_s} \quad (10)$$

且故障后定子电压满足式(11)。

$$ku_s = \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_s \psi_s \quad (11)$$

解式(11)微分方程可得

$$\psi_s = \frac{ku_s}{j\omega_s} + \frac{(1-k)u_s}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} \quad (12)$$

考虑定子电阻的影响,定子磁链的暂态部分会不断衰减,其衰减时间常数 $T_s = \frac{L'_s}{R_s}$ 。从而故障时的定子磁链表达式为

$$\psi_s = \frac{ku_s}{j\omega_s} + \frac{(1-k)u_s}{j\omega_s} e^{-j\omega_s t} e^{-t/T_s} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)可得

$$\frac{d\psi_s}{dt} = -(1-k)u_s e^{-j\omega_s t} e^{-t/T_s} \quad (14)$$

根据文献[14]可知,在同步旋转坐标系下,转子磁链初始时刻表达式为

$$\psi_r(0_+) = \frac{L_m}{j\omega_s L_s} u_s e^{-j\omega_s t} \quad (15)$$

同理可知,考虑到转子电阻和撬棒电阻的影响,可得撬棒电阻投入后的转子磁链表达式为

$$\psi_r = \frac{L_m}{j\omega_s L_s} u_s e^{-j\omega_s t} e^{-t/T_r} \quad (16)$$

式中,转子衰减时间常数 $T_r = \frac{L'_r}{R_r + R_c}$, R_c 为撬棒电阻阻值。

将式(15)、式(16)代入式(7),可以得到同步旋转坐标系下的等效电动势,其表达式为

$$E = \frac{L_m^2}{L_r L_s} u_s e^{-j\omega_s t} e^{-t/T_r} - (1-k)u_s e^{-j\omega_s t} e^{-t/T_s} \quad (17)$$

将式(17)转换到三相静止坐标系下,此时等效电动势表达式为

$$E = \frac{L_m^2}{L_r L_s} u_s e^{j\omega_s t} e^{-t/T_r} - (1-k)u_s e^{-t/T_s} \quad (18)$$

由式(18)可知,在三相静止坐标系下,撬棒电阻投入后,双馈风电机组会将变流器闭锁,此时转子将会失去励磁电源,由于磁链不可以突变,此时的双馈风电机组的短路等效电动势由两部分组成。其中暂态交流分量与故障前的风机转速以及故障后的机端电压有关,并按照转子时间常数不断衰减,暂态直流分量仅与故障后的机端电压有关,并按照定子时间常数不断衰减。

2.2 故障稳态阶段的等效电动势

根据式(18)可知,由于撬棒电阻的投入,双馈风电机组的等效电动势会不断衰减,导致双馈风电机组馈出的短路电流也不断衰减,当短路电流衰减到一定程度后,风电机组会投出撬棒保护。经过短暂的控制响应过程后,风电机组会恢复到双馈状态,并执行低电压穿越时的控制策略^[15]。

根据我国新的风电并网标准 GB/T19963-2011《风电场接入电力系统技术规定》^[16],故障期间风电机组应该为电网提供无功支持,并且在有功电流未超过功率变流器最大限流时,有功电流应该由故

障前的输出功率和跌落的电压决定, 此时提供的无功电流为

$$\begin{cases} i_{rd_ref} = f(u_s) = i_{rd0} + K_d(0.9 - ku_s)i_{rN}, (K_d \geq 1.5) \\ i_{rq_ref} = -\frac{2}{3} \frac{L_s P_0}{L_m u_s}, (0 \leq i_{rq_ref} \leq \sqrt{i_{rmax}^2 - i_{rd_ref}^2}) \end{cases} \quad (19)$$

式中: i_{rmax} 为功率变流器最大限流电流; i_{rN} 为转子额定电流; K_d 为无功电流增益系数。

当双馈风电机组经过短暂的响应过程, 进入稳态阶段后, 式(7)中的微分项 $\frac{d\psi_s}{dt} = 0$, 此时等效电动势表达式为

$$E = j\omega_s \frac{L_m}{L_r} \psi_r \quad (20)$$

根据式(20)可知, 当双馈风电机组进入稳态阶段后, 等效电动势完全由转子磁链决定。

结合式(3)、式(4)、式(19), 消去式中的定子电流可得转子磁链的表达式为

$$\psi_r = L_r' \left(K_i i_{rN} - j \frac{2L_s P_0}{3L_m u_s} \right) + \frac{L_m}{L_r} \cdot \frac{ku_s}{j\omega_s} \quad (21)$$

式中: 转子等效电感 $L_r' = L_r - \frac{L_m^2}{L_s}$; 转子额定电流增益系数 $K_i = K_d(0.9 - u_s)$ 。

将式(21)代入式(20), 可以得到执行低电压穿越控制策略时的等效电动势表达式为

$$E = jX_r' \frac{L_m}{L_r} K_i i_{rN} + \frac{2}{3} \cdot \frac{L_s X_r' P_0}{L_r u_s} + \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 ku_s \quad (22)$$

由式(21)可知, 双馈风电机组在恢复控制后, 变流器会为转子继续提供持续稳定的励磁, 此时双馈风电机组的等效电动势由两部分组成, 其中一部分交流分量由故障期间机端电压决定, 另一部分交流分量由低电压穿越的无功电流和故障前输出的有功功率决定。

假设由双馈风电机组低电压穿越的无功电流和故障前输出的有功功率决定的电动势为 E_i , 其表达式为

$$E_i = \frac{2}{3} \cdot \frac{L_s X_r' P_0}{L_r u_s} + jX_r' \frac{L_m}{L_r} K_i i_{rN} \quad (23)$$

基于以上假设, 在双馈风电机组执行低电压穿越的控制策略时, 转换到三相静止坐标系下的双馈风电机组等效电动势表达式为

$$E = \left(\frac{L_m}{L_r} \right)^2 ku_s e^{j\omega_s t} + E_i e^{j\omega_s t} \quad (24)$$

3 双馈风电机组故障时三相短路电流计算方法

由以上分析可知, 双馈风电机组故障时的短路电流主要由两部分组成。一是撬棒电阻投入后, 风电机组处于失控状态, 励磁电源断开, 不再为转子提供励磁电流, 此时的等效电动势是由按照转子时间常数衰减的交流分量和定子时间常数衰减的直流分量组成。当短路电流不断减小, 撬棒电阻投出, 风电机组恢复控制, 并执行低电压穿越的控制策略, 此时的等效电动势为稳态交流量。将两种状态下的等效电动势分别代入等效电路中, 可得到两种状态下的三相短路电流。

将式(17)代入式(8)中, 可得撬棒电阻投入后的双馈风电机组短路电流表达式为

$$i_s = \frac{1}{R_s + X_s'} \left[ku_s e^{j\omega_s t} + (1-k)u_s e^{-t/T_s} - \frac{L_m^2}{L_r L_s} u_s e^{j\omega_s t} e^{-t/T_r} \right] \quad (25)$$

其中初始时刻短路电流和最大短路电流为

$$i_{s(0+)} = \frac{1}{R_s + X_s'} \left[ku_s e^{j\omega_s t} - \frac{L_m^2}{L_r L_s} u_s e^{j\omega_s t} + (1-k)u_s \right] \quad (26)$$

$$i_{smax} = \frac{1}{R_s + X_s'} \left[ku_s e^{j\omega_s t} + (1-k)u_s e^{-t/2T_s} - \frac{L_m^2}{L_r L_s} u_s e^{j\omega_s t} e^{-t/2T_r} \right] \quad (27)$$

将式(23)代入式(7)中, 可得变流器恢复控制状态下的短路电流为

$$i_{s稳态} = \frac{\left[1 - \left(\frac{L_m}{L_r} \right) \right] ku_s - E_i}{R_s + X_s'} e^{j\omega_s t} \quad (28)$$

4 仿真验证

根据双馈风电场实际的拓扑结构, 利用在 DigSILENT/PowerFactory 建立如图 4 所示的仿真模型, 并使用 Matlab 对数据进行处理。其中双馈风电机组参数如下: 额定容量为 2 MW, 视在功率为 2.222 MVA, 机端额定电压为 0.69 kV, 极对数为 2,

采用 Y 联结方式, 定子电阻为 0.01 p.u., 定子电抗为 0.1 p.u., 转子电阻为 0.01 p.u., 转子电抗为 0.1 p.u., 定转子励磁电抗为 3.5 p.u.。

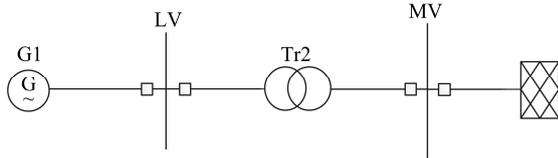


图 4 双馈风电机组仿真模型
Fig. 4 Simulation model of DFIG

分别在机端电压不同的跌落程度下, 对双馈风电机组的三相短路过程进行仿真, 从而得到三相短路电流的仿真结果, 并与本文所推导的短路电流公式的计算值进行对比验证。

假设双馈风电机组在故障前运行在额定工况下, 在 $t=0$ s 时, 电网发生三相金属性短路。短路电流的仿真结果以及计算值的波形图如图 5 所示。

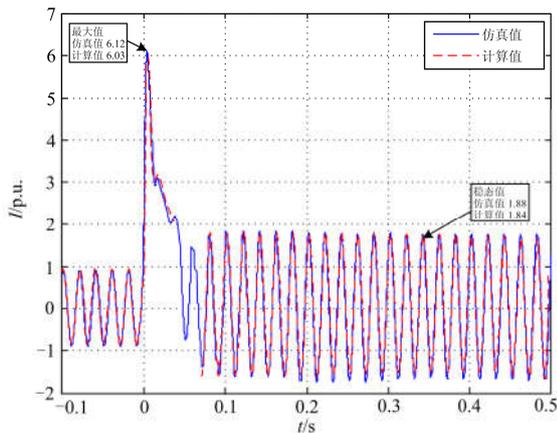


图 5 满负荷金属性短路双馈风机短路电流
Fig. 5 Full load short-circuit current of DFIG metal short circuit

由波形图可知, 仿真值和计算值的曲线拟合程度很高。在故障初始时刻, 短路电流瞬间增大, 其最大幅值为 6.12 p.u., 依据本文所提短路电流计算方法所计算的最大幅值为 6.03 p.u., 两者误差为 1.5%。之后短路电流随着时间不断衰减, 撬棒电阻投出, 经过很短时间的控制响应之后, 进入稳态阶段, 短路电流的稳态值为 1.88 p.u., 依据本文所提短路电流计算方法所计算的稳态值为 1.84 p.u., 两者误差为 2.1%。

设故障前双馈风电机组工作于 0.8 倍额定工况, 0 s 时双馈风电机组机端电压跌落到 0.5 倍额定电压。此时仿真值和计算值的波形图如图 6 所示。

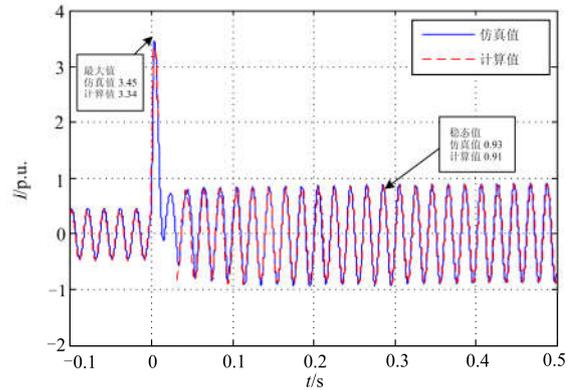


图 6 0.8 倍工况电压跌落到 50% 双馈风机短路电流
Fig. 6 DFIG metal short circuit of 0.8 times working voltage drops to 50%

由图 6 可知, 短路电流的仿真值和计算值的曲线拟合度很高。故障发生后, 仿真所得的短路电流增大至 3.45 p.u., 计算值为 3.34 p.u., 两者误差为 3.2%。之后电流不断衰减, 进入稳态阶段, 仿真所得的短路电流稳态值为 0.93 p.u., 计算值为 0.91 p.u., 两者误差为 2.1%。

为了验证本文所提方法的正确性, 在不同工况下进行了仿真和计算, 短路电流的仿真和计算结果如表 1 所示。

表 1 三相短路电流最大值

Table 1 Maximum value of three-phase short-circuit current

短路电流最大值 $I_{k \max} / \text{p.u.}$ (仿真值/计算值)		故障时的机端电压 $u_s / \text{p.u.}$		
		$u_s = 0$	$u_s = 0.2$	$u_s = 0.5$
故障前风机工 况 $P_0 / \text{p.u.}$	$P_0 = 1$	6.12/6.03	4.47/4.38	3.55/3.42
	$P_0 = 0.8$	6.10/5.98	4.40/4.33	3.45/3.34
	$P_0 = 0.6$	5.59/5.50	4.13/4.01	3.10/3.02

由表 1 可知, 在短路故障前, 双馈风电机组执行最大功率追踪的控制策略, 风电机组的转速与工况成一定的函数关系, 因此双馈风电机组在发生三相短路故障时, 撬棒电阻投入, 此时馈出的最大短路电流只与故障前的风机工况和机端电压的跌落深度有关。由表 2 可知, 在进入稳态阶段以后, 风电机组馈出的短路电流由故障前的风电机组工况和机端电压的跌落深度决定。

根据以上仿真分析, 本文所提出的等效电路和短路电流计算方法适用于不同工况下双馈风电机组在发生三相短路故障时的短路电流计算。

表 2 三相短路电流稳态值

Table 2 Steady-state value of three-phase short-circuit current

短路电流最大值 $I_{k(稳态)} / \text{p.u.}$ (仿真值/计算值)		故障时的机端电压 $u_s / \text{p.u.}$		
		$u_s = 0$	$u_s = 0.2$	$u_s = 0.5$
故障前风	$P_0 = 1$	1.88/1.84	1.52/1.48	0.95/0.93
机工况	$P_0 = 0.8$	1.85/1.80	1.46/1.39	0.93/0.91
$P_0 / \text{p.u.}$	$P_0 = 0.6$	1.81/1.78	1.42/1.34	0.88/0.84

5 结论

1) 分析了双馈风电机组的故障特性, 以及撬棒电阻投入和低电压穿越控制阶段的等效电动势特性, 得出了故障时双馈风电机组的等效电路模型。

2) 分析并计算出了双馈风电机组在发生三相短路故障时的等效电动势表达式, 也给出了相对应的短路电流表达式。得到了故障时脱离控制策略的双馈风电机组的等效电路, 以及短路电流计算方法, 并通过仿真, 验证了等效电路以及短路电流计算方法的正确性。

参考文献

- [1] ZHENG D, ESEYE A T, ZHANG J, et al. Short-term wind power forecasting using a double-stage hierarchical ANFIS approach for energy management in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 136-145. DOI: 10.1186/s41601-017-0041-5.
- [2] 盛万兴, 马静, 张瑜, 等. 基于故障等值网络的双馈风电机组三相短路电流计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 7-14.
SHENG Wanxing, MA Jing, ZHANG Yu, et al. Research on calculation method of three-phase short circuit current for doubly-fed wind power generator based on the fault equivalent network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 7-14.
- [3] 焦在强. 大规模风电接入的继电保护问题综述[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 195-201.
JIAO Zaiqiang. A survey on relay protection for grid-connection of large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 195-201.
- [4] 李菁, 郑涛, 赵裕童, 等. 双馈风电短路电流特性对距离保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 37-47.
LI Jing, ZHENG Tao, ZHAO Yutong, et al. Impact of doubly-fed wind system short-circuit current characteristics

on the transmission line distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 37-47.

- [5] 王燕萍. 双馈风电机组暂态特性及对配网保护的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
WANG Yanping. Research on transient characteristics of wind power generation with doubly fed induction generator and the influence on protection of distribution network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 曹鹏飞, 陈璨, 刘辉, 等. 基于撬棒保护的双馈风机不对称故障下短路电流特性分析[J]. 华北电力技术, 2016(12): 24-30.
CAO Pengfei, CHEN Can, LIU Hui, et al. Unsymmetrical short circuit current analysis of doubly fed induction generators with crowbar protection[J]. North China Electric Power, 2016(12): 24-30.
- [9] 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.
- [10] 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 Buhan, 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.
- [11] 柳鑫, 刘晓华, 吕文芳, 等. 考虑撬棒保护动作的双馈风机故障暂态特性分析[J]. 电力科学与工程, 2016, 32(1): 49-52.
LIU Xin, LIU Xiaohua, LÜ Wenfang, et al. Fault transient characteristic analysis of doubly fed induction generator wind turbines considering operation of crowbar protection[J]. Electric Power Science and Engineering, 2016, 32(1): 49-52.
- [12] 李斌, 王欣, 赵黎丽, 等. 考虑撬棒保护的双馈风力发电机定子短路电流计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(4): 1-6.
LI Bin, WANG Xin, ZHAO Lili, et al. Calculation of DFIG stator short-circuit current considering crowbar protection[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2017, 29(4): 1-6.
- [13] 王增平, 李菁, 郑涛, 等. 不同撬棒保护投入时刻下双馈风电机组短路电流计算分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 109-117.
WANG Zengping, LI Jing, ZHENG Tao, et al. Calculation and analysis of three-phase short-circuit current of doubly fed wind turbine considering different crowbar protection insertion time[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 109-117.
- [14] 孟岩峰, 胡书举, 王玲玲, 等. 电网故障条件下双馈机组运行特性分析及其协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 106-113.
MENG Yanfeng, HU Shuju, WANG Lingling, et al. Characteristics analysis and coordinated control of the doubly-fed wind power system undergrid transient fault[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 106-113.
- [15] 尹俊, 毕天姝, 刘素梅, 等. 持续励磁情况下双馈风机短路电流计算方法研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2016, 43(1): 1-6.
YIN Jun, BI Tianshu, LIU Sumei, et al. Short-circuit current calculation method of doubly-fed wind turbines with uninterrupted excitation[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science), 2016, 43(1): 1-6.
- [16] 王伟胜, 迟永宁, 张占奎, 等. 《风电场接入电力系统技术规定》解读: GB/T 19963—2011[J]. 中国标准化(英文版), 2016, 77(2): 86-89.
WANG Weisheng, CHI Yongning, ZHANG Zhankui, et al. 《Standard on Connecting Wind Farms to Power System》unscramble: GB/T 19963—2011[J]. Standards Dissection (English Edition), 2016, 77(2): 86-89.

收稿日期: 2017-09-05; 修回日期: 2017-12-12

作者简介:

徐岩(1976—), 男, 副教授, 研究方向为电力系统安全保护与控制; E-mail: xuyanhd@ncepu.edu.cn

申南轩(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风电场故障特性分析。E-mail: 1532212206@qq.com

(编辑 姜新丽)