

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190890

考虑风电机组馈入电流的风电场汇集线路保护整定计算方法

龚永智¹, 陶 晔¹, 许传敏¹, 罗正娅¹, 徐 岩²

(1. 云南电网有限责任公司临沧供电局, 云南 临沧 677000; 2. 华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 现行风电场馈线电流保护的整定计算, 按照馈线末端有灵敏性整定, 当弱电网接入且馈线较长时将造成高灵敏度和低选择性, 存在保护误动风险。首先分析了低电压穿越对风电机组短路电流的影响, 研究了影响风电机组短路电流的主要因素。然后介绍了风电场典型的保护配置, 将风电场场内进行了保护区域划分, 研究了馈线电流保护的配置规则。接着分析了风电场馈线电流保护的误动风险, 以及馈线首端风电机组故障和相邻馈线首端故障时馈线电流保护误动产生的原因。基于上述理论分析, 提出了考虑风电机组馈入电流的保护整定计算二次验证法, 并给出了计算实例。

关键词: 风电场; 短路电流; 馈线电流保护; 误动性; 保护整定计算

Relay protection setting calculation of wind farm collector lines considering wind turbine increased short-circuit current

GONG Yongzhi¹, TAO Ye¹, XU Chuanmin¹, LUO Zhengya¹, XU Yan²

(1. Lincang Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Lincang 677000, China;

2. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The current protection setting calculation of wind farm feeder lines is based on sensitivity setting at the end of the feeder line. It will result in high sensitivity and low selectivity of the protection when a weak power grid is connected and the feeder line is longer. Thus there is a risk of relay protection mis-operation. First, this paper analyzes the influence of low voltage ride-through on the short-circuit current of wind turbines, and studies the main factors affecting the short-circuit current of wind turbines. Secondly, a typical relay protection configuration of the wind farm is introduced. The protection areas in a wind farm are divided. The protection configuration rules of feeder line current protection are studied. Then the risk of protection mis-operation of the feeder line current protection of wind farm is analyzed. The causes of the mis-operation of the feeder line current protection are studied during the feeder head-end wind turbine fault or the adjacent feeder lines head-end fault. Based on the above theoretical analysis, a secondary verification method for the current protection setting calculation of the wind farm feeder lines is proposed and a calculation example is given.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307059).

Key words: wind farm; short circuit current; feeder current relay protection; misoperation; relay protection setting calculation

0 引言

近年来, 中国风电装机容量迅速增长, 已成为名副其实的风电大国。我国风资源主要分布在“三北”地区, 风电装机呈现“弱电网集中接入”的特点^[1-3]。集中式风电场一般采用典型的集中式接入架构, 35 kV 汇集线路接入多条馈线, 每条馈线接入多台风电机组。

目前, 在风电场的保护方面, 国内外学者已开展了相关工作^[4-9]。文献[10-11]分析了考虑低电压穿越和撬棒保护的风电机组短路电流特性, 指出风电场的短路电流不仅与故障点位置、故障类型有关, 也与风电机组的低电压穿越控制策略有关。文献[12]则分析了影响双馈型风电场短路电流的主要因素。文献[13-16]分析了故障期间风电场间的相互影响机理, 提出了双馈风电场群的短路电流计算方法。文献[17-18]对国内外清洁能源并网继电保护方面所面临的挑战和展望进行了讨论。文献[19]提出了集电

线路电流保护新的整定方法与控制策略, 以协调撬棒保护与风电场集电线路保护动作之间的关系。文献[20]建立了计及其励磁调节特性影响的短路电流计算模型。但相关文献很少讨论保护整定计算的过程, 也未关注保护整定计算过程中对风电机组馈入短路电流的计及与否。

现有的馈线电流保护整定计算中, 一般按照风电场馈线末端故障有灵敏性整定, 实际计算中采用小方式运行时末端相间故障时的短路电流。小方式运行, 即为风电机组全部处于零出力或关机状态下, 馈线短路电流仅由交流电网侧提供, 对风电机组馈入的短路电流不予考虑。风电场继电保护按照此种方案配置, 可以增强其灵敏性, 当风电场发生小故障时可快速切除故障。但馈线首端风电机组故障和相邻馈线首端严重故障时, 即近电气距离的严重故障时, 馈线电流保护存在误动风险, 现有保护整定方案降低了馈线电流保护的选择性和可靠性。

本文首先介绍了考虑低电压穿越的风电机组短路电流特性, 进而分析风电场汇集线路的保护配置和短路电流特性, 论述馈线电流保护的误动风险, 并尝试解决误动问题。

1 考虑低电压穿越的风电机组短路电流特性分析

风电机组短路电流特性, 即风电机组在电网发生故障时所提供的短路电流变化特性。故障发生之初, 风电机组的短路电流变化受到低电压穿越的直接影响。

1.1 低电压穿越过程中风电机组短路电流特性

风电机组的低电压穿越装置多采用撬棒保护, 撬棒保护的一般过程为: 当转子电流超过一定值时转子侧变流器闭锁撬棒投入, 转子短接撬棒电阻, 为浪涌电流提供通道, 使转子短路电流直流分量迅速衰减, 当电流衰减到一定值时撬棒投出。撬棒未投入或已投出阶段, 风电机组应根据机端电压跌落程度保持有功出力或发出无功电流支撑电网电压, 直到故障消除系统恢复正常或最后风电机组低电压脱网。

故障发生后, 由于短路电流上升极快, 撬棒投入的实际时间距故障发生时间极短(仅数 ms)。假设撬棒投入前短路电流直流分量的衰减时间常数约为 T_s , 则撬棒投入后暂态直流分量的衰减时间常数 T_r' 为

$$T_r' \approx \frac{R_s}{R_r + R_{cr}} T_s \quad (1)$$

式中, R_s 、 R_r 、 R_{cr} 分别为双馈风机的定子电阻、

转子电阻和撬棒接入电阻, 且 $R_s < R_r < R_{cr}$ 。

由式(1)可知, 撬棒投入后短路电流衰减时间常数减小, 短路电流迅速衰减, 使得撬棒很快投出。可将撬棒投入后风电机组短路电流变化过程分为两个阶段: 快速衰减阶段和稳态阶段。如图 1 中所示为一台加入撬棒保护的风电机组的短路电流暂态, 20 s 时故障发生, 可以观察到故障发生约 10 ms 撬棒投入后短路电流快速衰减, 100 ms 后(即 20.1 s 时刻)风电机组短路电流已进入稳态。

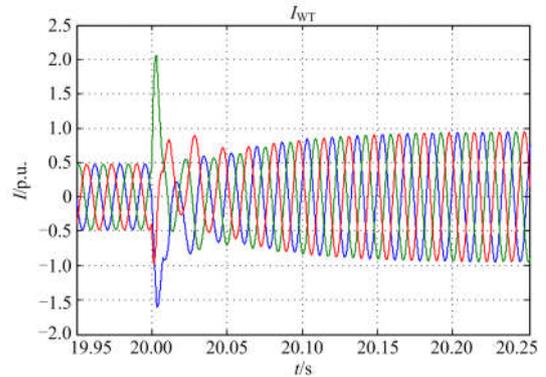


图 1 加入撬棒保护的风电机组短路电流暂态图

Fig. 1 Short circuit current transient of wind turbine with crowbar

短路电流快速衰减后撬棒切出, 风机回到双馈状态。在双馈状态下, 转子短路电流可以通过功率给定值 $P_{ref} + jQ_{ref}$ 计算得到。

$$\begin{cases} i_{dr_ref} = \frac{P_{ref}}{\omega_r} \frac{X_s}{X_m U_t} \\ i_{qr_ref} = \frac{1}{X_m} \left(-\frac{Q_{ref} X_s}{U_t} - U_t \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_{dr_ref} 和 i_{qr_ref} 分别为转子电流直轴和交轴分量; ω_r 为转子转速; U_t 为机端电压; X_s 为定子电抗; X_m 为定转子交互电抗。

根据低电压穿越策略, 风电机组在低电压穿越期间应根据机端电压 U_t 跌落程度发出一定的有功和无功。故障发生后机端电压跌落程度是一定的, 那么风电机组功率给定值也保持不变, 那么可认为风电机组进入双馈状态后, 转子短路电流进入稳态。

故障发生后风电机组在 100 ms 内即完成了短路电流瞬时增大和快速衰减的暂态过程。由于保护装置动作时间约 0.1 s(包含信号传递、继电器动作、断路器切断等时间), 保护装置动作时短路电流可能已经衰减, 所以在保护整定中难以将暂态过程作为依据, 应以稳态短路电流作为参考。

1.2 影响风电机组短路电流特性的因素分析

由上文的分析可知, 影响风电机组短路电流的

因素主要有:

(1) 风电机组机端电压跌落程度

电网故障会造成并网点和机端电压的跌落,不同严重程度故障造成的机端电压跌落深度不同,会造成风电机组短路电流的大小差异。一般认为在一定范围内机端电压跌落越深,风电机组短路电流增加越多。

(2) 故障前风电机组出力

由于风速的随机变化,风电机组的出力状态也在不断地变化。发生故障时风电机组的出力状态也是不定的,其有功电流也不同。

(3) 低电压穿越控制策略

不同国家对风电机组的控制要求不同,不同厂家的控制策略也不同,造成不同风电机组的短路电流特性存在一定差异。故障中的低电压穿越策略和动态无功支撑策略,对风电机组短路电流的影响尤为突出。

2 风电场典型的保护配置

2.1 风电场典型网络架构和场内保护配置

典型风电场的汇集线路一般为干线式(链式)结构。这种结构由一条干线馈送电能,每条馈线上多组风电机组只需设置一组保护设备,采用的开关设备较少,节约了电缆成本。大型风电场一般采用多条馈线,在并网点汇集后经风电场变电站升压后并入公用电网,如图2所示。

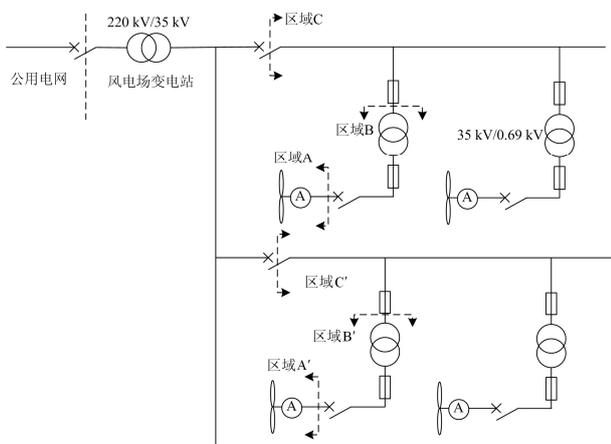


图2 风电场典型网架结构及场内保护配置

Fig. 2 Typical grid structure and protection configuration of wind farm

从风电场保护的角度出发,可将风电场划分为若干个保护区域^[21],如图2所示。

故障区域A:即风力机、发电机和电力电子换流器发生的故障,包括风机定、转子绕组匝间短路

故障,风机三相、单相接地故障,电力电子元器件故障等,可将此区域中的故障统称为风机故障。

故障区域B:包括35 kV/0.69 kV变压器(风电机组单元变压器)故障和690 V电缆故障,也包括690 V断路器故障等,可将区域A、B中的故障统称为风电机组故障。

故障区域C:包括风电机组单元变压器高压侧熔断器到馈线断路器之间任意位置的接地故障,即汇集线路发生三相、单相短路故障等,可将此区域中的故障统称为馈线故障。馈线故障可根据其故障点距离并网点的远近分为馈线首端故障和馈线末端故障。同时为了后续讨论相邻馈线故障时的情形,将图1中所示故障区域C'内的故障称为相邻馈线故障。

风机生产厂商在风机的控制与保护系统中加入了低电压穿越、短路保护、超速保护等众多保护措施,以应对风机的内部和外部故障。为了保护电网的安全稳定,发生严重风机故障时690 V断路器断开,将风机从系统中切出。风电机组单元变压器低压侧熔断器用作变压器690 V侧的电缆保护,高压侧35 kV熔断器用作变压器的保护。35 kV熔断器难以作为变压器的全面保护,还需加入综合微机保护等。风电场一般占地面积大,风机分布稀疏,35 kV线路长且回路多、设备多,导致35 kV集电系统发生单相接地故障和相间故障的概率较大。为了保护风电场集电系统,每条馈线上应配置有效且全面的继电保护装置,将馈线故障及时清除。

2.2 风电场馈线电流保护配置

大型风电场根据风电场机组分散的特点,在串有多台风电机组的馈线上配置完备的继电保护装置,以保证风电场保护安装的经济性与实用性。

典型的风电场网架结构下,35 kV集电系统线路长且回路多、设备多,发生故障的概率较大,且集电系统的故障多为永久性故障。为了保护风电场的集电系统,风电场馈线上应配置电流保护和相间距离保护,本文则主要针对上述保护,讨论风电场馈线电流保护的整定计算。

风电场馈线电流保护需要满足可靠性、选择性、灵敏性、速动性的要求,现有馈线电流保护整定的主要原则^[22-23]为

- 1) 过流I段,按本线路末端相间故障有足够灵敏性整定,灵敏系数不小于1.5,时间可取为0 s。
- 2) 过流II段,按躲过本线路最大负荷电流整定,尽量对本线路最远端风电机组单元变压器低压侧故障有灵敏性,时间比过流I段多一个级差。
- 3) 汇集线路不采用自动重合闸。

4) 每回汇集线路应在汇集母线侧配置一套线路保护, 在风机侧不配置线路保护。

5) 时间级差一般为 0.3 s。

3 风电场馈线电流保护的误动风险

风电场实际保护整定计算中, 采用小方式运行时末端相间故障时的短路电流作为计算参考值。小方式运行对风电机组馈入的短路电流不予考虑, 可能造成馈线电流保护的误动。本节分别研究馈线故障、风电机组故障和相邻馈线故障时的馈线短路电流特性, 分析馈线电流保护的误动风险。

3.1 馈线故障时短路电流特性分析

馈线故障可以发生在风电机组单元变压器高压侧到并网点之间任一点, 可以发生在馈线首端至末端任一处。图 3 所示为馈线故障时风电场简化模型图, 图中 Grid 表示电网, WG 表示除了所保护馈线外其他馈线所有风电机组的集合, WT 表示风电机组, X_{Σ} 表示电源至并网点的总电抗, Z 表示线路阻抗, I_{feeder} 表示馈线的短路电流。馈线短路电流由电网、其他馈线风电机组以及所保护馈线风电机组提供。

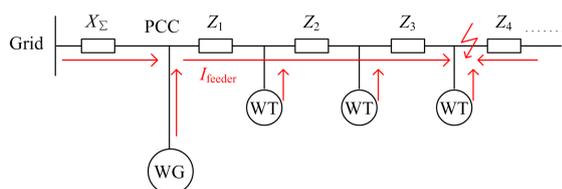


图 3 馈线故障时风电场简化模型

Fig. 3 Simplified circuit model of the wind farm with short circuit fault in feeder line

馈线故障短路电流的大小受多种因素的影响, 主要有故障点距并网点的距离、故障的严重程度、电网和其他馈线风电机组所提供短路容量的大小等。(1) 由于馈线线路阻抗不可忽略, 假定线路阻抗均匀, 故障点距离并网点越远, 则故障点与并网点之间的阻抗越大, 馈线短路电流越小。(2) 故障的严重程度不同, 如金属接地和非金属接地, 其短路电流也不同。(3) 电网和其他馈线风电机组能够提供的短路容量大小直接影响馈线短路电流大小。我国大型风电基地多采用弱电网接入, 则接入系统的强弱即系统短路容量的大小对馈线短路电流也有明显的影响。弱电网条件下, 短路容量较小, 相同故障的短路电流也较小。

馈线保护整定时依据馈线末端相间故障的短路电流进行计算, 原因在于当馈线末端发生故障时, 并网点距离故障点最远, 并网点与故障点之间的线

路阻抗最大, 相应馈线短路电流最小。设置馈线最小短路电流为保护整定值使馈线电流保护具有高灵敏性, 但同时降低了选择性, 需要考虑风电机组故障和相邻馈线故障时的误动风险。

3.2 风电机组故障时馈线电流保护误动性分析

风电机组故障时馈线短路电流与故障点距并网点距离、故障严重程度、接入系统强弱相关, 同时也与风电机组单元变压器电抗有关。图 4 所示为风电机组故障时风电场简化模型, 图中设置与图 3 一致, 其中 X_c 表示风电机组单元变压器的电抗。

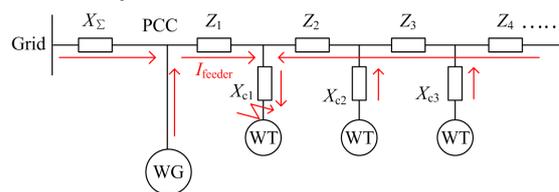


图 4 风电机组故障时风电场简化模型

Fig. 4 Simplified circuit model of the wind farm with short circuit fault in wind turbine generator

风电机组单元变压器高压侧故障可认为是馈线故障, 其故障短路电流与馈线故障短路电流没有差别, 若变压器高压侧速断保护未及时动作将必须由馈线保护切除整条馈线, 此时并非保护误动, 不在本节讨论范围内。

风电机组单元变压器低压侧发生故障时, 由于变压器电抗较大, 变压器低压侧故障时馈线短路电流一般较小。但当距离馈线首端最近的风电机组发生故障时, 尤其是大方式运行下相邻馈线等效机组 WG 馈入大量短路电流, 若此时馈线短路电流与馈线远端故障短路电流接近, 在风电机组单元变压器低压侧保护装置动作之前馈线过流 I 段保护瞬时动作, 将切除整条馈线的所有风电机组, 造成误动。

风电机组故障时馈线电流保护发生误动的原因: 一方面是馈线末端与并网点电气距离太远, 馈线过流 I 段保护的敏感度高, 加之其速动性, 早于单元变压器低压侧保护装置动作之前动作; 另一方面是大方式运行下相邻馈线的风电机组馈入短路电流大, 而整定计算时小方式运行下并未考虑风电机组馈入的短路电流, 将风电机组按照负荷或零出力处理。

3.3 相邻馈线故障时馈线电流保护误动性分析

风电场集电系统具有多条馈线时, 当其中一条馈线发生故障时难免对相邻馈线造成影响。图 5 所示为相邻馈线故障时风电场简化模型, 馈线 1 为所讨论馈线, 馈线 2 为故障的相邻馈线, 其余设置与图 3 一致。馈线 1 向发生故障的馈线 2 提供助增短

路电流,所提供短路电流的大小主要由并网点电压的跌落程度和馈线 1 风电机组出力状态决定。并网点电压跌落越深,馈线 1 上的短路电流越大;馈线 1 上风电机组出力越接近于满发,原始有功电流越大,馈线 1 上的短路电流越大。

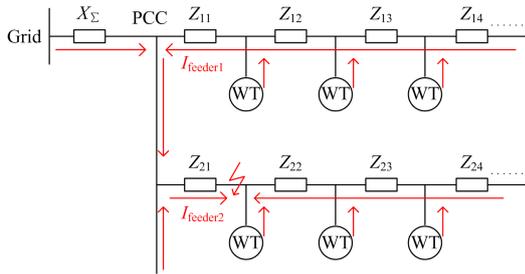


图 5 相邻馈线故障时风电场简化模型

Fig. 5 Simplified circuit model of the wind farm with short circuit fault in an adjacent feeder line

若相邻馈线的首端位置发生严重故障,且馈线 1 处于满发状态,则馈线 1 短路电流骤增。在馈线 2 故障完全切除之前,馈线 1 的过流 I 段保护瞬时动作,使得馈线 1 与馈线 2 同时切除。馈线 1 整条馈线未发生故障却被切除,造成误动。

相邻馈线故障时馈线电流保护发生误动的原因:一方面是长馈线和保护整定的高敏感度和速动性;另一方面也是大小方式运行的选择,未考虑相邻馈线风电机组馈入的短路电流。

4 考虑风电机组馈入电流的保护整定计算二次验证法

本节首先介绍三种整定计算中常采用的风电机组短路电流计算方法,然后提出基于短路容量法的保护整定计算二次验证法,并通过实际风电场案例进行计算分析。

4.1 计及风电机组短路电流的短路计算方法

计算风电机组短路电流常采用基本标幺值法^[24]、基于 IEC60909 标准的等效电压源法^[25-26]和短路容量法^[27-28]。

基本标幺值法是一种利用风电场各元件的标幺化暂态参数进行短路计算的方法。风电场由单台或几台风电机组进行等值,再通过其实时稳态数据计算等值风电机组的暂态电势。该计算方法在短路计算前需获得风电场的实时数据,且计算过程有一定耗时,常用于风电场短路电流的实时在线计算。

基于 IEC60909 标准的等效电压源法是一种采用 IEC60909 标准进行修正处理来进行风电场短路电流计算的方法。该方法通过在短路点引入一个虚

拟等效电压源,设置其电压修正系数 c ,并将系统中所有电压源电势均置零,然后修正部分阻抗元件的阻抗值,再通过基本电路化简的方法计算短路点的短路电流。通过改变等效电压源的修正系数 c ,可得到风电场的最大与最小短路电流值。该方法计算思路清晰,无需获知风电场的实时信息,适合风电场初期规划时的短路电流计算。

短路容量法是一种将风电场中所有元件均用其短路容量来表示,如式(3)所示,然后通过网络化简的方法,得到归算至短路点的系统短路容量值,再计算短路点短路电流值的方法。短路容量法只需获取风电场内各设备的额定参数即可,无需获得风电场实时状态,但只能进行系统的三相短路电流计算。该方法简单易于操作,适合风电场运行人员快速估算风电场对短路点提供的短路电流值,也适合整定计算人员对整定计算结果进行二次验证。

$$\begin{cases} I_{sc} = \frac{S_{sc}}{\sqrt{3}U_{Nsc}} \\ S_{WTsc} = \frac{S_{WT}}{x'_s} \\ S_{Tsc} = \frac{S_{TN} \times 100}{u_k \%} \\ S_{Lsc} = \frac{U_{LN}^2}{X_L} \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_{sc} 为短路点三相短路电流(kA); S_{sc} 为短路点短路容量(MVA); U_{Nsc} 为短路点额定电压(kV); 下标 WT、T、L 分别代表风电机组、变压器、线路; $u_k\%$ 为变压器短路比; X_L 为线路电抗的有名值(Ω)。

对比三种方法,基本标幺值法适用于实时短路电流在线计算,基于 IEC60909 标准的等效电压源法适用于风电场规划时的短路电流计算,短路容量法适用于短路电流快速估算和整定计算的二次验证计算。

4.2 基于短路容量法的保护整定计算二次验证法

根据第 3 节的分析可知,风电场馈线电流保护误动的原因主要是长馈线、保护整定方案的高敏感性和整定计算过程未考虑风电机组馈入短路电流。保护整定方案的高灵敏性和速动性问题,文献[7]已经进行了详细叙述,需在高灵敏度的基础上兼顾选择性,本文不再详细分析。长馈线则作为下文讨论的基本前提。

针对整定计算过程未考虑风电机组馈入短路电流的问题,本文提出基于短路容量法的保护整定计算二次验证法。风电场首先进行馈线电流保护整定计算,包括过流 I 段和过流 II 段整定值计算,然后

针对风电机组故障和相邻馈线误动风险进行二次验证。即通过短路容量法, 计算馈线首端风电机组单元变压器低压侧发生三相故障时的最大馈线短路电流 I_{test1} , 计算电气距离最近的相邻馈线首端位置发生三相故障时的最大馈线短路电流 I_{test2} , 然后通过与过流 I 段整定值进行对比, 验证是否存在误动风险。验证公式为

$$I_{test} - I_{set1} \leq -t\%I_{set1} \quad (4)$$

式中: I_{test} 为校验值, 包括 I_{test1} 和 I_{test2} , I_{test1} 为过流 I 段整定值; $t\%$ 为校验比例, 一般设置为 10%~20%。

若校验不通过, 说明存在误动风险, 需对整定值 I_{test1} 进行修正处理。修正处理一般是将整定值进行放大处理, 再次校验, 直至通过为止。需要注意的是, 一般过流 II 段整定值 I_{set2} 也需要随 I_{test1} 的修

正处理进行适当调整。

4.3 计算实例

本文在 Matlab/Simulink 平台进行仿真实验。仿真中采用双馈风机, 且以图 6 所示的典型网架结构为例。图 6 的模型参数主要根据内蒙古赤峰某风电场 A 和 B 的实际参数(风电场 A 具体参数为 49 MW 风电场, 6 条馈线, 每条馈线 3~4 台风机, 并网的系统阻抗为 0.02 p.u.; 风电场 B 的系统阻抗为 0.05 p.u., 其余参数与风电场 A 相同。通常情况下, 系统阻抗大于 0.05 p.u. 的电网将被考虑为弱电网)搭建。选择风电场 A 和 B 分别进行馈线电流保护整定计算的二次验证, 其中风电场 A 的馈线过流 I 段整定值 $I_{set1}=2.045$ kA, 风电场 B 的馈线过流 I 段整定值 $I_{set1}=2.467$ kA, 校验比例 $t\%$ 均取 12%。

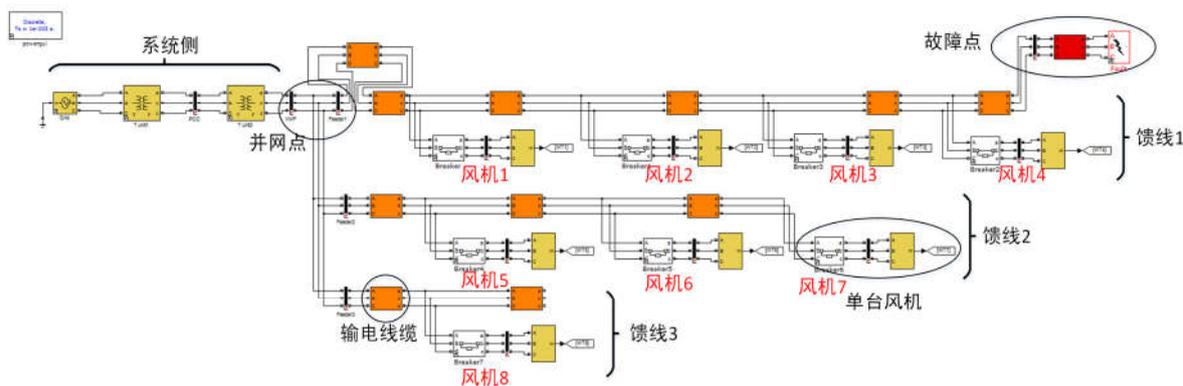


图 6 基于实际风电场参数的仿真算例

Fig. 6 Simulation case based on practical parameters of wind farm

二次验证结果如表 1 所示, 风电场 A 通过了二次验证, 风电场 B 未通过 I_{test2} 的验证, $I_{test2} - I_{set1} = -8.7\% I_{set1}$, 需对风电场 B 的过流 I 段整定值进行调整。

表 1 馈线电流保护整定计算的二次验证实例

Table 1 Example of secondary verification for feeder current protection setting calculation

风电场	校验项目	最大短路电流/kA	校验是否通过	初始整定值
A	I_{test1}	1.21	通过	$I_{set1}=2.045$ kA,
	I_{test2}	1.52	通过	$t\%=12\%$
B	I_{test1}	1.51	通过	$I_{set1}=2.467$ kA,
				$t\%=12\%$

放大后得风电场 B 的 $I'_{set1} = 2.714$ kA, 再次进行校验 $I_{test2} - I'_{set1} = -17.1\% I'_{set1}$, 通过了校验。

5 结论

本文介绍了风电机组低电压穿越过程中短路电

流特性及其对继电保护整定的影响, 研究了风电场的保护区划分, 重点分析了馈线电流保护的误动性, 针对误动性提出了考虑风电机组馈入电流的保护整定计算二次验证法, 并进行了计算实例分析。主要分析结论如下:

(1) 本文分析了低电压穿越过程中风电机组的短路电流特性, 将撬棒投入后分为快速变化的暂态阶段和缓慢变化的稳态阶段, 并得出保护整定不宜参考暂态变化阶段的结论。

(2) 对风电场进行了保护区的划分, 更清晰地说明了风电场的典型网架结构和保护配置。

(3) 针对风电场馈线电流保护配置, 深入分析了风电机组故障和相邻馈线故障时的短路电流特性, 进而论证了馈线电流保护的误动风险, 并分析了产生误动性的主要原因: 一方面是长馈线和保护整定的高敏感度和速动性; 另一方面是整定计算时未考虑相邻馈线风电机组馈入的短路电流。

(4) 针对馈线电流保护的误动风险, 本文提出了

基于短路容量法的保护整定计算二次验证法, 并通过实际案例进行了计算分析, 对解决实际弱电网接入风电场的馈线电流保护选择性不足问题具有较高的推广价值。

参考文献

- [1] 刘明洋, 潘文霞, 杨刚. 双馈风力发电机群短路电流实用计算方法[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1475-1479.
LIU Mingyang, PAN Wenxia, YANG Gang. Practical calculation method of short-circuit currents contributed by doubly-fed wind turbine cluster[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1475-1479.
- [2] 李媛媛, 孙自安, 张志刚. 大规模风电机组集中接入对系统短路电流的影响[J]. 中国电力, 2018, 51(4): 33-38.
LI Yuanyuan, SUN Zi'an, ZHANG Zhigang. Impact of wind centralized access on system short circuit current[J]. Electric Power, 2018, 51(4): 33-38.
- [3] 屠卿瑞, 陈桥平, 李一泉, 等. 考虑不同转差的双馈风力发电机短路计算序分量模型[J]. 广东电力, 2018, 31(10): 50-58.
TU Qingrui, CHEN Qiaoping, LI Yiquan, et al. Sequence component models for short-circuit calculation of DFIG with different slips[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(10): 50-58.
- [4] 徐岩, 申南轩, 朱晓荣, 等. 适用于继电保护整定计算的双馈风电机组等效模型[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 114-120.
XU Yan, SHEN Nanxuan, ZHU Xiaorong, et al. Equivalent model of DFIG for relay protection setting calculation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 114-120.
- [5] 潘建兵, 徐宁, 徐军, 等. 低负荷密度区域配电线路多级配合方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 164-169.
PAN Jianbing, XU Ning, XU Jun, et al. Study on the method for multi-level protection of low load distribution lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 164-169.
- [6] EKANAYAKE J B, HOLDSWORTH L, WU X G, et al. Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 803-809.
- [7] NOURELDEEN O, HAMDAN I. A novel controllable crowbar based on fault type protection technique for DFIG wind energy conversion system using adaptive neuro-fuzzy inference system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(4): 328-339. DOI: 10.1186/s41601-018-0106-0.
- [8] 古庭赞, 张羽, 赵阳羊, 等. 适用于电力系统动态分析的双馈式感应风机模型[J]. 智慧电力, 2018, 46(12): 7-14.
GU Tingyun, ZHANG Yu, ZHAO Yangyang, et al. Model of doubly-fed induction generator applicable to power system dynamic analysis[J]. Smart Power, 2018, 46(12): 7-14.
- [9] 陈洁羽, 谈震, 刘俊, 等. 风电电源阻抗特性对相量式距离保护的影响分析[J]. 智慧电力, 2018, 46(12): 63-68.
CHEN Jieyu, TAN Zhen, LIU Jun, et al. Influence of impedance characteristic of wind power supply on phasor-based distance protection[J]. Smart Power, 2018, 46(12): 63-68.
- [10] 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.
- [11] 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 short-circuit 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.
- [12] 袁嫣红, 吴峰, 李继红, 等. DFIG 风电场短路电流计算影响因素分析[J]. 可再生能源, 2018(3): 391-397.
YUAN Yanhong, WU Feng, LI Jihong, et al. Analysis for influence factors on short-circuit current calculation of DFIG wind farm[J]. Renewable Energy Resources, 2018(3): 391-397.
- [13] 尹俊, 毕天姝, 薛安成, 等. 计及低穿控制的混合型风电场短路电流特性与故障分析方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 99-110.
YIN Jun, BI Tianshu, XUE Ancheng, et al. Study on short-circuit current and fault analysis method of hybrid wind farm with low voltage ride-through control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 99-110.
- [14] 尹俊, 李彦彬, 熊军华, 等. 双馈风电场群短路电流计算与故障分析方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 113-122.
YIN Jun, LI Yanbin, XIONG Junhua, et al. Short circuit

- current calculation and fault analysis method of DFIG wind-farm groups[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(8): 113-122.
- [15] 尹俊, 李彦彬, 闫哲昆, 等. 改进的双馈风电机短路电流计算及保护方案研究[J]. *太阳能学报*, 2017, 38(6): 1475-1481.
YIN Jun, LI Yanbin, YAN Zhekun, et al. Improved short-circuit current calculation method and protection scheme for doubly-fed wind turbine[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2017, 38(6): 1475-1481.
- [16] 郭家圣, 刘汉江. 考虑电压分布的风电场短路电流计算方法[J]. *广东电力*, 2017, 30(12): 55-61.
GUO Jiasheng, LIU Hanjiang. Calculation method for wind power field short circuit current considering voltage distribution[J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(12): 55-61.
- [17] 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.
- [18] 陈国平, 王德林, 裘愉涛, 等. 继电保护面临的挑战与展望[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(16): 1-11.
CHEN Guoping, WANG Delin, QIU Yutao, et al. Challenges and development prospects of relay protection technology[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(16): 1-11.
- [19] 车倩, 陆于平. 采用 Crowbar 实现低电压穿越的风电场继电保护定值整定研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(2): 97-102.
CHE Qian, LU Yuping. Research on wind farm relay protection value setting based on Crowbar circuit LVRT technology[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(2): 97-102.
- [20] 肖繁, 张哲, 尹项根, 等. 含双馈风电机组的电力系统故障计算方法研究[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(1): 14-23.
XIAO Fan, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. The fault calculation method of power systems including doubly-fed induction generators[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(1): 14-23.
- [21] QURESHI W A, NAIR N K C. Large scale renewable power generation[M]. Singapore: Springer, 2014: 311-329.
- [22] 国家能源局. 并网风电场继电保护配置及整定技术规范: DL/T1631—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [23] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(2): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [24] 伍文俊, 钟彦儒, 伍超. 基于标么值法的三相 PWM 整流电源[J]. *西安理工大学学报*, 2007, 23(4): 351-354.
WU Wenjun, ZHONG Yanru, WU Chao. Three-phase PWM rectifier based on per unit system[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2007, 23(4): 351-354.
- [25] 王吉祥. 风电场短路故障特性及其短路电流计算方法的研究[D]. 南京: 国网电力科学研究院, 2013.
WANG Jixiang. Research on characteristic of the short-circuit faults and the calculation methods of its short-circuit current in wind power plants[D]. Nanjing: State Grid Electric Power Research Institute, 2013.
- [26] 徐书凯, 周鹏, 贾玉霞. 基于等效电压源法炼化企业电网短路电流计算[J]. *电气应用*, 2018, 37(20): 21-25.
XU Shukai, ZHOU Peng, JIA Yuxia. Calculation of short-circuit current of rectification enterprise grid based on equivalent voltage source method[J]. *Electrical Application*, 2018, 37(20): 21-25.
- [27] 马小平, 苏宏升, 马小军. 基于短路容量法的并网风电场短路电流分析[J]. *科学技术与工程*, 2013, 13(1): 170-174.
MA Xiaoping, SU Hongsheng, MA Xiaojun. Wind farm based on the short circuit capacity of the grid short-circuit current analysis[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(1): 170-174.
- [28] OKEDU K E, MUYEEN S M, TAKAHASHI R, et al. Wind farms fault ride through using DFIG with new protection scheme[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2012, 3(2): 242-254.

收稿日期: 2019-07-24; 修回日期: 2019-12-12

作者简介:

龚永智(1982—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: lwl20180724@126.com

徐岩(1976—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: xuyanworkncepu@126.com

(编辑 魏小丽)