

# 规模化风电接入对系统短路电流的影响分析

周 专<sup>1</sup> 赵志强<sup>2</sup> 王新刚<sup>2</sup> 张增强<sup>1</sup> 宋新甫<sup>1</sup> 关洪浩<sup>1</sup>

(1. 国网新疆电力公司经济技术研究院 新疆 乌鲁木齐 830016;

2. 国网新疆电力公司发展策划部 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 随着国家政策对环保型、可再生能源利用及能源开发方面的倾斜,以及风电并网技术的不断提高,风电装机规模迅猛增长,对风电开发由分散式开发转化为集中式开发。但规模化风电接入给电网运行带来许多问题,如电压控制、短路电流、设备选型等问题。规模化风电集中接入,将对系统提供一定的短路电流,影响设备选型、升压站中低压侧的运行方式等,从而制约风电的集中开发建设。因此通过对不同风电机组型号(双馈式和直驱式)及不同容量的单个风电机组对系统提供的短路电流分析,根据风电机组短路PMU录波曲线和风电机组模型短路仿真曲线,提出了一种工程计算方法,计算出不同型号和不用容量的风电机组次暂态电抗,进而建立风电场短路电流计算模型,分析一个风电场对系统提供的短路电流。为风电场及风电汇集站的规划设计和设备选型提供了重要的参考依据。

**关键词:** 风电场; 风电机组; 次暂态电抗; 短路电流

**Abstract:** With the inclination of national policy on environmental protection, renewable energy utilization and energy development, and the constant improvement of wind power technology, the installed capacity of wind power grows rapidly, and the development of wind power is changed from the distributed development to the centralized development. But large-scale wind power integration brings many problems to the operation of power grid, such as voltage control, short-circuit current, equipment selection etc. The centralized integration of large-scale wind power will provide a certain short-circuit current, influence the equipment selection and operating mode in mid-voltage side and low-voltage side of booster station, thereby it constrains the concentrated development and construction of wind power. Therefore, through the short-circuit current analysis supplied by a single wind turbine with different wind turbine models (double-fed and direct-drive) and different capacity, an engineering calculation method is proposed based on short-circuit PMU recorded wave curve of wind turbine and short-circuit simulation curve of wind turbine model. It can calculate the subtransient reactance of wind turbines with different models and capacity, thereby the calculation model of short-circuit current for wind farms is established to analyze the short-circuit current supplied by a wind farm to the system. It provides an important reference for the planning, design and equipment selection of wind farms and wind power collecting stations.

**Key words:** wind farm; wind turbine; subtransient reactance; short-circuit current

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)05-0017-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.05.004

## 0 引言

近几年,随着国家政策对环保型、可再生能源利用及能源开发方面的倾斜,中国风力发电已进入一个快速发展的时期。随着对风能资源的大力开发,风电场呈现出大规模集中接入开发趋势。新疆地区风能资源丰富,拥有九大风区,截止到目前新疆风电装机容量达到7 243 MW。根据规划后续风电的开发均以集中接入、集中送出方式开发,到“十三五”

基金项目:国家自然科学基金项目(51267017)

末新疆电网风电装机容量将达到41 000 MW。

由于风力发电是利用自然界的风能,将风能转化为动能,再将动能转化为电能的一种发电方式,因此风力发电特性区别于常规机组。规模化风电接入电网将引发一系列问题,如电压控制问题、短路电流问题、继电保护等问题<sup>[1-3]</sup>。以前由于风电呈现分散形式开发,普遍认为风电场对系统提供短路电流可以忽略不计,对风电场的研究主要集中在电压控制、并网后对电能质量以及稳定问题的影响,而对风电场接入系统后短路电流贡献问题研究较少。但是随着风电单机容量以及装机规模越来越大,呈现集

中接入特点,风电场提供的短路电流将不可忽略。规模化风电场提供的短路电流,将影响风电场接入系统方式、设备选型、升压站中低压侧的运行方式等,从而制约风电的集中开发建设。

因此通过对不同风电机组型号(双馈式和直驱式)及不同容量的单个风电机组对系统提供的短路电流分析,根据风电机组短路PMU录波曲线和风电机组模型短路仿真曲线,提出了一种工程计算方法,计算出不同型号和不同容量的风电机组次暂态电抗,进而建立风电场短路电流计算模型,分析一个风电场对系统提供的短路电流。为风电场及风电汇集站的规划设计和设备选型提供了重要的参考依据。

### 1 风电场概况

目前单个风电场装机容量为49.5 MW,但是为了实现风电集中开发送出,多个风电场同时接入同一风电场升压站,一般一个220 kV风电汇集站装机容量为400 MW。因此从装机容量角度来看,一个风电汇集站相当于一座常规电站。因此,随着风电场装机规模越来越大,风电场对系统的短路不可忽视,将影响设备选型、系统运行方式等。

风电场的电气系统是由许多的电器元件、导体连接而成,主要是由风力发电机组、箱式变电站、集电线路和主变压器组成。如图1所示。

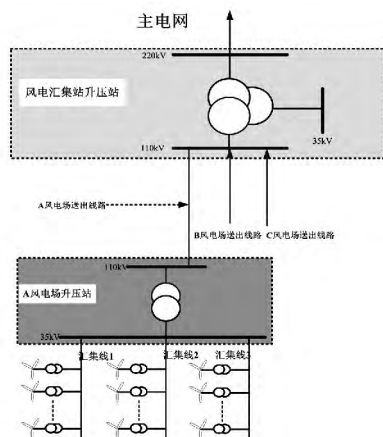


图1 风电场组成

风电场中各电气元件在短路过程中表现出来的电气特性各不相同。在工程实际应用中,短路计算通过对整个电气系统中的组成元件进行合理的等值、简化,在不改变其主要电气特性的前提下,将复杂的电气网络简化成为可供计算的电路模型。以下

将针对风力发电机组、箱式变电站、集电线路和主变压器这4个元件在风电电气系统中的作用和自身特点对它的等值电路模型分别进行讨论<sup>[4-5]</sup>。

#### 1) 箱式变电站和主变压器的等值电路模型

箱式变电站和主变压器在系统中的作用和运行方式与火电工程是相同的,因此在风电场等值电路模型中,认为变压器的磁路是不饱和的,铁心的电抗值不随电流大小发生变化,同时忽略励磁电流的影响,将其等效为一个电抗。

#### 2) 集电线路的等值电路模型

对于风电场集电线路来说,  $R > X/3$ ,即电阻对短路电流影响很大,此时,考虑将集电线路的  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$  阻抗来代替电抗  $X$ 。

#### 3) 单台风电机组的等值电路模型

通过对发电机短路电流分析,影响发电机提供系统短路电流大小与发电机的次暂态电抗有关  $X''_d$ 。普通发电机出口侧短路电流计算公式为

$$I = \frac{1}{X''_d} \times \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B} \quad (1)$$

常规同步发电机次暂态电抗值为0.12~0.2之间。

由于风力发电机组通过电力电子元件与电网相连,风电机组的运行特性及其控制模式与火电发电机组是完全不同的。因此,风电机组对系统提供的短路电流不能简单的按常规发电机组同步发电机组处理。

### 2 风电机组短路特性

目前,中国已经投运的风电场中包括3种主要的风力发电机组,包括鼠笼式异步风力发电机组、双馈式异步风力发电机组、直驱式永磁同步风力发电机组。其中鼠笼式异步风力发电机组本身结构和控制简单,目前应用的较少。本次研究分析主要针对双馈异步风力发电机和直驱式永磁同步风力发电机组。

#### 2.1 直驱式永磁同步风力发电机组

直驱永磁风电机组系统包括以下几个模块: 风机、永磁同步发电机、全功率变流器。其结构示意图如图2所示。

直驱式永磁同步风力发电机组通过整流逆变电力电子元件与电网相连,与电网不存在直接电气耦合。电网电压的瞬间降落会导致输出功率的减小,

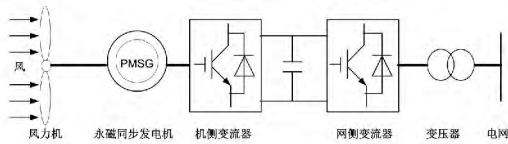


图2 直驱永磁风电系统结构示意图

而发电机的输出功率瞬时不变,显然功率不匹配将导致直流母线电压上升,这势必会威胁到电力电子器件安全。如采取控制措施稳定直流电压,必然会导致输出到电网的电流增大<sup>[6-8]</sup>。

以风电场的1.5 MW风机为例,针对风机出口发生单相、三相短路故障情况短路电流结果如图3所示。

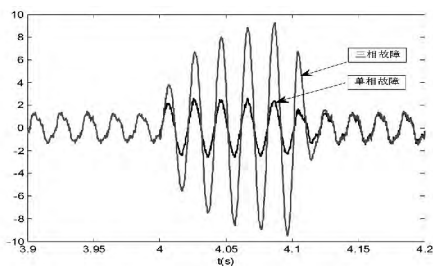


图3 直驱风机出口短路电流波形

当风机出口发生单项短路故障时,直驱风机能提供持续恒定的短路电流,稳态短路电流大约是额定电流的1.3~1.4倍。三相短路故障时,直驱风机的瞬时最大故障电流达到额定电流的4倍,向电网提供的短路电流瞬间出现波动,故障期间能提供几乎恒定的故障电流。在两种故障下,直驱风机都能提供几乎恒定的持续短路电流,这是因为直驱风机为永磁体励磁,故障发生后发电机能提供持续的励磁电流,在故障期间电流几乎是恒定的,故障消除后电流恢复正常。

### 2.2 双馈异步风力发电机组

双馈式异步风力发电机组定子直接连接电网。其结构示意图如图4所示。

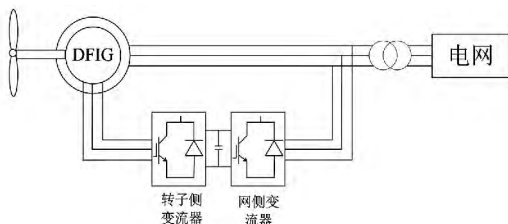


图4 双馈风电系统结构示意图

双馈式异步风力发电机组定子直接连接电网。这种直接耦合使得电网电压的降落直接反映在电机定子端电压上,导致定子磁链出现直流成分,不对称故障时还会出现负序分量。定子磁链的直流量和负

序分量相对于以较高转速运转的电机转子会形成较大的转差,从而感生出较大的转子电势并产生较大的转子电流,导致转子电路中电压和电流大幅增加<sup>[9]</sup>。

以风电场的1.5 MW风机为例,针对风机出口发生单相、三相短路故障情况短路电流结果如图5所示。

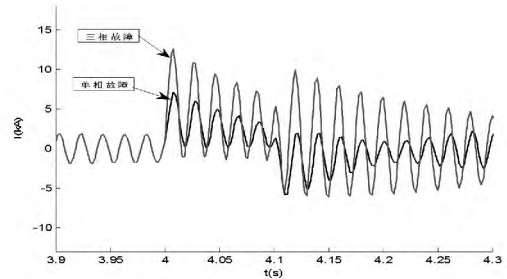


图5 双馈风机出口短路电流波形

当风机出口发生单相短路时,双馈机组能提供的短路电流呈衰减特性,最大短路电流是额定值的3.7倍,0.1s后基本与额定电流值相当。三相短路故障时,双馈机组的瞬时最大故障电流达到额定电流的7倍,而且故障电流呈衰减特性,在故障结束时,电流出现较大的波动。在两种故障下,双馈风机提供衰减的短路电流,双馈机组在故障开始时电流瞬间达到最大,随着发电机的端电压降低,发电机失去励磁,转子过电流保护启动,将转子及变换器通过外接电阻短路,由于转子电阻增大,风机出口的短路电流急剧减小,所以呈衰减特性。

### 2.3 不同容量风电机组等值次暂态电抗

通过上述单台风电机组短路电流特性分析,根据PMU数据以及短路电流仿真计算可以得出风电机组出口侧短路电流。由于风电机组原理与普通的发电机或感应电动机相似,也会存在次暂态电抗,但风电机组结构中还有许多电力电子元件组成,导致次暂态电抗计算复杂。提出一种工程计算方法,即根据公式(1)短路电流计算原理,倒推可以得出单台风电机组等值次暂态电抗。根据大量分析录波数据以及风电机组仿真曲线,一般认为双馈异步风力发电机的短路电流为3~4倍负荷电流,直驱式同步发电机的短路电流为2倍负荷电流<sup>[10-11]</sup>。表1为不同容量和机型的风电机组等值次暂态电抗。

通过表1计算得出的单个风电机组等值次暂态电抗,建立风电场详细短路电流计算模型,就可以计算出风电场对系统提供的短路电流计算值。

表1 不同容量和机型的风电机组等值次暂态电抗

	双馈异步发电机			直驱同步发电机		
	/MW			/MW		
	1.5	2	2.5	1.5	2	2.5
风机短路电流 /kA	5.02	6.69	8.37	2.51	3.35	4.18
等值次暂态电抗	0.20	0.15	0.12	0.40	0.30	0.24

### 3 算例分析

某风电场装机容量为49.5 MW,由33台1.5 MW风力发电机组组成,通过3回汇集线接入风电场升压站35 kV侧,风电场升压站主变压器容量为50 MVA,再通过1回110 kV线路送出线路接入风电汇集站110 kV侧。

风电场35 kV集电线路采用LGJ-185型导线,阻抗 $X=0.395 \Omega/\text{km}$ ,汇集线1上接带10台风机,长度为4.5 km,汇集线2上接带12台风机,长度为5.5 km,汇集3上接带11台风机,长度为5 km。风电场送出线路采用LGJ-240型导线,阻抗 $X=0.378 \Omega/\text{km}$ ,送出线路长度为6 km。风电机组箱变主变压器容量为1.6 MVA,短路电压百分比为6%,风电场升压变压器的短路电压百分比为10.5%,风电场汇集站的短路电压百分比 $U_{12}=13.42\%$ 。

通过短路电流计算,得出各节点短路电流值如表2所示。

表2 风电场对各节点提供的短路电流值

	风电场升压站		风电汇集站	
	35 kV侧	110 kV侧	110 kV侧	220 kV侧
	/kA	/kA	/kA	/kA
双馈风机	0.406	0.124	0.123	0.061
直驱风机	0.291	0.09	0.09	0.044

由表2可以看出风电场对系统提供一定的短路电流。一个49.5 MW风电场对接入点110 kV侧提供0.09~0.123个kA,对接入点220 kV侧提供0.044~0.061个kA。同时不同机组型号对系统提供的短路电流也不一样,双馈异步风力发电机提供的短路电流比同步直驱式风力发电机提供的短路电流要大。

### 4 结论

通过对双馈式和直驱式风电机组短路特性分析,得出风电机组对系统提供一定的短路电流。根据风电机组短路PMU录波曲线和风电机组模型短路仿真曲线,得出双馈异步风力发电机的短路电流

为3~4倍负荷电流,直驱式同步发电机的短路电流为2倍负荷电流。根据短路电流计算原理,提出了风电机组等值次暂态电抗的工程计算方法,计算出不同型号和不用容量的风电机组次暂态电抗,进而建立了风电场短路电流计算模型,计算结果表明一个49.5 MW风电场对接入点110 kV侧提供0.09~0.123个kA,对接入点220 kV侧提供0.044~0.061个kA。同时不同机组型号对系统提供的短路电流也不一样,双馈异步风力发电机提供的短路电流比同步直驱式风力发电机提供的短路电流要大。因此随着规模化风电的集中接入,对系统提供的短路电流不可忽略,在规划设计阶段以及电网运行时需要重点关注风电场汇集站短路电流水平。

#### 参考文献

- [1] 吴俊玲.大型风电场并网运行的若干技术问题研究[D].北京:清华大学,2004.
- [2] 田春琴,李琼林,宋晓凯.风电场建模及其对接入电网稳定性的影响分析[J].电力系统保护与控制,2009(19):46-51.
- [3] 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(2):1-8.
- [4] 徐岩,卜凡坤,赵亮,等.风电场联络线短路电流特性的研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(13):31-36.
- [5] 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(1):170-174.
- [6] 曹增功,牟宏,王春义,等.风电场短路试验与风电短路特性分析[J].山东电力技术,2015(2):8-14.
- [7] 崔洪远,岳亮,高亮.风力发电机组并网运行短路故障仿真分析[J].上海电力学院学报,2011,27(5):482-484.
- [8] 关宏亮,赵海翔,刘燕华,等.风力发电机组对称短路特性分析[J].电力自动化设备,2008(1):61-64.
- [9] 时芝勇,周剑,张薇,等.2种风电机组对电网三相短路电流的影响[J].陕西电力,2010(10):61-64.
- [10] 栗然,高起山,刘伟.直驱永磁同步风电机组的三相短路故障特性[J].电网技术,2011(10):153-158.
- [11] 马越,陈星莺,余昆,等.不同类型短路故障下双馈风机短路电流分析[J].电力系统及其自动化学报,2014(2):60-65.

作者简介:

周专(1987),硕士,工程师,研究方向为电力系统规划、稳定与控制;

赵志强(1977),硕士,高级工程师,研究方向为电力系统规划;

王新刚(1978),本科,高级工程师,研究方向为电力系统规划;

张增强(1982),硕士,工程师,研究方向为电力系统规划与分析。  
(收稿日期:2015-06-08)