

DA GUIMO FENGDIAN CHANGQUN DUANLU DIANLIU
JISUAN YU GUZHANG FENXI FANGFA YANJIU

大规模风电场群短路电流 计算与故障分析方法研究

尹 俊◎著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

大规模风电场群短路电流 计算与故障分析方法研究

尹 俊◎著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

• 北京 •

内 容 提 要

我国风电发展迅速,风力发电采用集群化开发、集中并网已成为我国风电发展的主要形式之一。

本书主要对大规模风电场群短路电流计算与故障分析方法进行了研究,主要内容包括:各类型风电机组短路电流特性与计算方法综述、故障下不同类型风电机组的短路电流特性、Crowbar 投入情况下计及转子电流动态特性影响的双馈风电机组短路电流计算方法研究、计及低电压穿越控制策略影响的双馈风电机组短路电流计算与故障分析方法研究、含多类型风电机组的混合型风电场短路电流计算与故障分析方法研究、大规模风电场群短路电流计算与故障分析方法研究等。

本书结构合理,条理清晰,内容丰富新颖,可供相关工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

大规模风电场群短路电流计算与故障分析方法研究 /
尹俊著. —北京:中国水利水电出版社, 2018. 6
ISBN 978-7-5170-6627-9

I. ①大… II. ①尹… III. ①风力发电—发电厂—短
路电流计算②风力发电—发电厂—故障诊断 IV.
①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 149582 号

书 名	大规模风电场群短路电流计算与故障分析方法研究 DA GUIMO FENGDIAN CHANGQUN DUANLU DIANLIU JISUAN YU GUZHANG FENXI FANGFA YANJIU
作 者	尹 俊 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址:www. waterpub. com. cn E-mail:sales@waterpub. com. cn 电话:(010)68367658(营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京亚吉飞数码科技有限公司
印 刷	三河市元兴印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16 开本 10.25 印张 133 千字
版 次	2018 年10月第 1 版 2018 年10月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	48.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

我国风电发展迅速,集群化开发、集中并网已成为我国风电发展的主要形式之一。目前我国已经建设完成 9 个千万千瓦级风电基地。然而,由于风电机组在发电机理、并网拓扑结构和控制方式等方面与同步发电机存在较大差异,使得其在故障期间的暂态特性较同步发电机发生了很大变化,故大量风电场以集群形式接入电网,给传统电力系统保护带来了巨大的挑战。其中,如何计算风电机组、场群的短路电流是分析风电场群接入电网对保护影响及研究保护新原理的基础。本书以此为题开展研究,取得的主要研究成果如下:

(1)因为风力发电机组与传统同步发电机在励磁结构、控制原理和运行特性上存在较大差异,风电的大规模接入电力系统已对电网的故障特性造成了显著影响,这给电网设备的选择、校验和继电保护配置、整定带来了新的挑战,所以有必要深入研究风力发电机的故障电流特性。本书分析了现在主要采用的双馈风电机组和永磁风电机组的短路电流特性研究现状,总结了现有文献中双馈风机和永磁风机短路电流的主要研究方法并指出了各种研究方法的优点和存在的不足。最后指出了现有风力发电机短路电流研究亟待解决的问题。

(2)为了研究风电机组在暂态过程中各种暂态特性,需要深入研究发生不同类型故障时风电机组的短路电流。求解风电机组的短路电流非常困难,这是因为不同类型风机的故障电流不同且与传统同步发电机差距很大。本书首先基于风电机组 Park 模型推导了电网发生对称短路和非对称短路故障下各种风电机组

的短路电流表达式,并分析了电网故障时各种风电机组的故障过程特征。利用 PSCAD (Power Systems Computer Aided Design) 搭建的风电机组仿真模型进行仿真,验证了不同类型风机的短路电流特性。为进一步研究能适应大规模风力发电接入的电网保护新原理和保护整定配置方案做好准备。

(3)提出了 Crowbar 保护电路投入情况下计及转子电流动态特性影响的双馈风机短路电流计算方法。从双馈风机暂态内电势变化机理角度出发,计及了 Crowbar 保护投入后转子电流动态过程的影响,计算了发生三相短路时双馈风机的定转子磁链,提出了一种改进的双馈风机短路电流有效值计算方法。仿真结果证明与以往假设转子 Crowbar 保护投入后转子励磁电流为零忽略其动态影响的方法相比,所提短路电流计算方法计算得到的短路电流初值和短路电流变化轨迹都具有更高的精度。

(4)提出了计及低电压穿越控制策略影响的双馈风机短路电流计算与故障分析方法。基于变流器的输入-输出外特性等值建立了变流器数学模型,进一步给出了考虑控制策略的双馈风机暂态模型。在分析低电压穿越控制策略对短路电流影响机理的基础上,提出了计及低电压穿越控制策略影响的双馈风机短路电流计算方法。并针对故障稳态时双馈风机等效电势的特性,提出了适用于 DFIG (Double Fed Induction Generator) 接入的电网故障分析方法。采用 RTDS (Real Time Digital Simulator) 建立了某实际双馈风电场仿真模型,验证了所提短路电流计算和故障分析方法具有较高的准确性。

(5)提出了含多类型风电机组的混合型风电场短路电流计算与故障分析方法。考虑了故障期间控制策略对风电机组暂态过程的影响,建立了双馈、永磁风电机组的单机等值模型。并在此基础上对风电机组暂态特性的主要影响因素进行分析,采用分群聚合等效的方法,提出了含多类型风机的混合型风电场简化等值模型,进一步分析了故障期间短路电流的变化机理,给出了混合型风电场的短路电流计算方法。针对故障稳态时双馈、永磁风电

机组等值电路的特性,提出了适用于风电场接入的电网故障分析方法,实现了风电场接入后对电网对称、不对称故障下各支路短路电流的计算。

(6)提出了一种风电场群接入电网后的短路电流计算与故障分析方法。分析了风电场短路电流与电网节点电压的耦合关系,揭示了风电场群内部、以及场群与系统间短路电流的相互影响机理,提出了风电场群的短路电流计算方法。并针对故障稳态时各风电场等值电路的特性,提出了适用于风电场群接入的电网故障分析方法,实现了风电场群接入后对电网对称、不对称故障下各支路短路电流的计算。

笔者在撰写本书时,得益于许多同仁前辈的研究成果,既受益匪浅,也深感自身所存在的不足。希望读者阅读本书之后,对本书提出批评建议。

作者

2018 年 4 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 本书的研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 本书研究内容和技术路线	11
第 2 章 各类型风电机组短路电流特性与计算方法综述	15
2.1 引言	15
2.2 双馈风电机组的短路电流特性研究	16
2.3 永磁风电机组的短路电流特性研究	22
2.4 本章小结	24
第 3 章 故障下不同类型风电机组的短路电流特性	25
3.1 引言	25
3.2 鼠笼型风电机组短路电流暂态特性	26
3.3 双馈型风电机组故障电流暂态特性	28
3.4 永磁风电机组短路电流暂态特性	36
3.5 各类型风电机组短路电流特性比较	38
3.6 本章小结	38
第 4 章 Crowbar 投入情况下计及转子电流动态特性影响的 双馈风电机组短路电流计算方法研究	40
4.1 引言	40
4.2 双馈风机电磁暂态模型	41

4.3	计及转子电流动态过程的双馈风机短路 电流计算	44
4.4	仿真验证及分析	48
4.5	本章小结	52
第5章	计及低电压穿越控制策略影响的双馈风电机组短路 电流计算与故障分析方法研究	54
5.1	引言	54
5.2	计及控制策略影响的双馈风机暂态模型	55
5.3	计及控制策略影响的双馈风电机组短路电流 计算	56
5.4	适用于双馈风电机组接入的电网故障分析方法 ..	64
5.5	仿真验证及分析	68
5.6	本章小结	76
第6章	含多类型风电机组的混合型风电场短路电流计算 与故障分析方法研究	78
6.1	引言	78
6.2	计及控制策略影响的风电机组等值模型	79
6.3	风电场风电机组分群聚合等值方法	89
6.4	混合型风电场短路电流计算方法	98
6.5	适用于风电场接入的电网故障分析方法	104
6.6	仿真验证及分析	108
6.7	本章小结	113
第7章	大规模风电场群短路电流计算与故障分析 方法研究	115
7.1	引言	115
7.2	风电场群短路电流计算方法	116
7.3	适用于风电场群接入的电网故障分析方法	120

7.4 仿真验证及分析	127
7.5 本章小结	133
第 8 章 结论与展望	135
8.1 总结	135
8.2 展望	136
参考文献	138

第1章 绪 论

1.1 本书的研究背景和意义

近年来,由于以煤炭为主的传统化石能源的日益枯竭以及环境污染问题的日益严峻,大力发展可再生型新能源已经成为我国解决能源短缺及环境污染治理的必然手段。据全国电力工业快报统计,2017年我国新增风电并网装机容量1503万kW,累计并网装机容量突破1.5亿kW大关达到1.6367亿kW,已占我国全部发电装机容量的9.2%。我国并网风电容量持续5年领跑全球,继2015年成为首个风电装机达到1亿kW的国家后,累计装机容量已占全球风电装机总容量的近35%^[1-3]。

随着以风力发电为代表的新能源电源在电网中所占比例的不断升高,其给现有电网安全运行所带来的影响也日益显现。特别是大规模风电机组接入电网后给现有电网保护装置的可靠运行带来了巨大的挑战^[4-5]。如近年来甘肃酒泉风电基地发生的“2·14”“4·25”等风电机组大规模脱网事故,均存在风电场、风电场群保护装置不合理动作,造成事故脱网范围扩大的现象^[6-7]。

研究并揭示风电机组、风电场接入电网后的短路电流计算方法是分析现有继电保护装置适应性以及提出保护新原理的基础。现在大规模风电机组并网后的短路电流计算方法研究正受到越来越多的关注^[8-9]。但是,现有相关研究在进行含大规模风电机组电网的短路电流计算时,通常将风电机组等效为同容量的同步风电机组来考虑^[10-13]。实际上,由于风电机组在发电机理、并网拓扑结构

和控制方式等方面与同步发电机存在较大差异,使得其在故障期间的暂态特性较同步发电机发生了很大变化,传统的短路电流计算方法在对含风电机组的电力系统进行故障分析时不再适用^[14-15]。

特别是近年来世界各国电力公司和电网运营商纷纷提出了新的风电机组并网规范。规范中要求风电机组在故障期间除了要能维持不脱网运行外,还需要通过调节控制策略向系统发出无功功率支撑电网电压的恢复,即风电机组需要具备低电压穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)的能力^[16]。在具备低电压穿越能力后由于风电机组其暂态特性与故障期间低电压穿越控制策略密切相关^[17-18],且受风电机组变流器等电力电子器件的限流、限压特性影响^[19],都使得故障期间风电机组输出的短路电流特性更加复杂。但是目前有关计及低电压穿越控制策略影响的风电机组短路电流特性的研究还比较少。

此外集群化开发、集中并网已成为我国风电发展的主要形式之一。如何计算风电场、场群的短路电流是分析大规模风电接入对电网保护影响及研究保护新原理的基础。现有针对大规模风电场、风电场群短路电流特性的研究文献还很少,已有的研究主要采用基于建立详细时域仿真模型的方法定性分析了大规模风电场群对电力系统短路电流水平的影响^[20]。实际上风电场故障分析建模中所采用风电机组多机等效方法及风电场群内部,以及场群与系统间短路电流的相互影响都会使短路电流计算结果产生较大的误差^[21],因此有必要对大规模风电场、风电场群接入后的电网短路计算方法进行深入的研究。

1.2 国内外研究现状

近年来,国内外学者在建立双馈、永磁风电机组及风电场、风电场群的短路电流计算方法方面做了许多积极的探索和研究,并积累了一定的成果,归纳为以下几个方面。

1.2.1 Crowbar 投入情况下的双馈风电机组短路电流计算方法

双馈风电机组由于具有运行风速范围广、有功和无功可独立解耦控制等优势被风电场作为主要的机型广泛使用。以往的短路电流计算中将同步发电机作为等效的戴维南电压源串联暂态阻抗进行分析计算,由于双馈风机中采用了大量非线性的电力电子器件及其变流器控制策略的影响使得传统的短路电流计算方法在对含双馈风机的电力系统进行短路计算时不再适用^[22-23]。因此现在迫切需要提出能反映双馈风电机组暂态故障特性的短路电流计算方法。

如图 1-1 所示,双馈风电机组定子侧直接接入电网,转子侧通过背靠背变流器对双馈电机进行交流励磁。在故障期间转子侧变流器的控制策略将会影响双馈风机输出的短路电流特性。现有文献主要分故障期间转子侧变流器投入撬棒(Crowbar)保护和投入撬棒保护两种情况对双馈风机的短路电流计算和故障分析方法进行了研究。

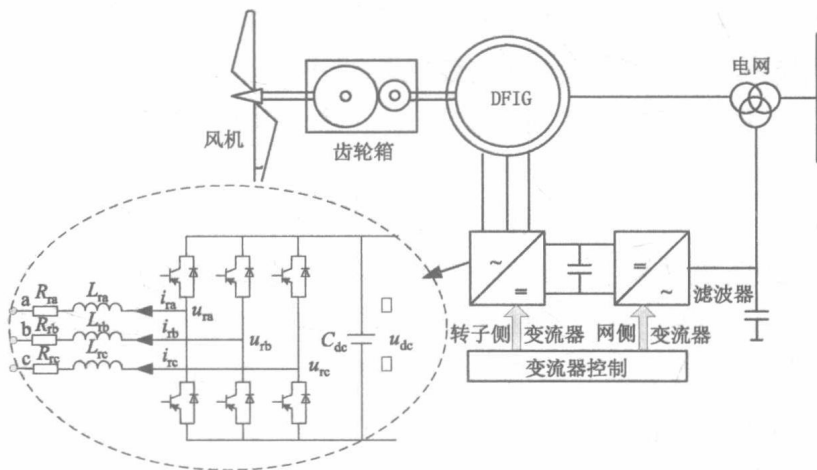


图 1-1 投入 Crowbar 情况下双馈风电机组主电路拓扑结构

在 Crowbar 投入情况下的双馈风电机组短路电流特性研究方面:文献[24]基于 Matlab/Simulink 建立了双馈风电机组的精细化仿真模型,通过仿真结果分析了不同故障类型、电压跌落深度、跌落时刻等因素对双馈风机短路电流的影响;文献[25]在转子 Crowbar 保护投入情况下,通过仿真结果定性地分析了双馈风电机组三相短路电流的组成和特点,提出双馈风电机组短路电流具有多态性,其故障电流与同步电机具有较大差异;文献[26]仿真分析了装有静止无功补偿器的双馈风电机组故障电流特性,仿真了不同无功补偿情况下双馈风电机组的短路电流特征。上述研究仅是从仿真角度定性地分析故障发生后双馈风机短路电流的特性,并未提出能反映故障期间双馈风机暂态特性的短路电流计算方法。

文献[27]分析了机端对称故障电压跌落为 0 情况下双馈风机的故障暂态过程,给出了对称电压跌落时定转子磁链求解公式,为计算双馈风机故障电流做了准备;文献[28-29]将 Crowbar 投入情况下的双馈风机等效为鼠笼异步发电机,并给出了双馈风机最大短路电流的计算公式,但并未进一步分析整个故障过程中双馈风机短路电流的暂态变化规律;文献[30]在前文基础上分析了电压对称跌落与恢复时双馈风机的暂态特性,给出了对应情况下的短路电流解析表达式;文献[31]进一步提出了减小短路电流计算误差的定子电压跌落系数修正方法,推导了双馈风机短路电流中周期、非周期分量的表达式。

进一步针对不对称故障情况,文献[32]分析了机端不对称故障下双馈风机的暂态全响应过程,为不对称暂态特性的研究打下了基础;文献[33]分析了撬棒接入后双馈感应发电机定转子磁链的全响应,给出了不对称电网电压跌落故障情况下的双馈风机短路电流时域表达式;文献[34-35]基于序分量法,建立了双馈风机的正、负序数学模型,进一步给出了 Crowbar 保护投入情况下的双馈风机不对称短路电流解析表达式。以上研究主要分析了空载、工频转速情况下的双馈风机短路电流计算,实际上故障发生

时双馈风机的运行工况、有功无功输出水平、转速等因素都将对其输出的短路电流特性造成影响。

文献[36-37]仿真分析了不同转速及不同有功、无功输出工况等因素对短路电流的影响。但这些分析只是通过仿真结果进行的定性分析;文献[38]分析了对称故障下转速对故障电流中衰减直流分量和衰减交流分量的影响,给出了受转速影响短路电流计算公式。文献[39]建立了考虑功率控制环节的双馈风电机模型,解析研究了有功无功波动对短路电流的影响。文献[40]指出了转子侧变流器续流二极管导致的直流母线箝位效应,及其对双馈风机短路电流的影响;文献[41-42]提出了一种饱和状态的双馈感应发电机模型,分析了主磁场以及漏磁场饱和对双馈风机暂态性能的影响。

以上研究在计算 Crowbar 投入情况下的双馈风电机组短路电流时,都是假设 Crowbar 接入后的转子变流器被短接,转子电流简单假设为零,忽略了转子电流的动态过程,这与短路故障后的实际转子电流变化轨迹不符。实际上双馈风机在故障发生后 Crowbar 保护投入,由于转子磁链在故障瞬间不能突变,转子绕组中会感应出较大的转子电流,转子电流可能达到额定值的 3~5 倍,后经过数十毫秒逐渐衰减为零。忽略转子电流的这一动态过程将会使短路电流的计算结果产生一定的误差,进而影响短路电流计算结果的准确性。

1.2.2 计及变流器控制策略影响的双馈风电机组短路电流计算与故障分析方法

为了确保电力系统的安全运行,近年来世界各国电力公司和电网运营商纷纷提出了新的风电机组并网规范。规范中要求风电机组在故障电压跌落期间除了要能维持不脱网运行外,还需要通过调节控制向系统发出无功功率支撑电网电压的恢复,即风电机组需要具备低电压穿越的能力。当系统需要双馈风机输出无

功电流为电压提供支撑时,受低电压穿越控制策略的影响,转子侧变流器需为 DFIG 提供持续励磁,此时,双馈风机转子变流器不能再简单通过 Crowbar 进行闭锁^[43]。

国内外已经有一些文献对并网双馈风电机故障期间转子变流器不闭锁情况下的短路电流特性进行了研究。

文献[44]考虑 Crowbar 投入、不投入等情况,仿真验证了不同控制策略情况下,双馈风机短路电流的“多态性”,指出了转子变流器不闭锁持续励磁时双馈风机会输出持续的稳态故障电流;文献[45-46]从不同低电压穿越控制策略下双馈风机励磁方式角度,仿真分析了电网发生故障时短路电流呈现的不同故障特征,验证了控制策略对双馈风机暂态特性的影响;文献[47]仿真分析了采用直流卸荷电路低电压穿越方式的双馈风机暂态过程响应,给出了直流卸荷电阻的选取方法。上述研究通过时域模型仿真的方法验证了低电压穿越方式的不同将会影响双馈风机输出的短路电流特性,但还未形成计及低电压穿越控制策略影响的双馈风电机组短路电流计算方法。

文献[48-49]在机端电压跌落程度不严重的情况下,假设故障前后转子励磁电流恒定,给出了双馈风机短路电流的解析式;文献[50]假设故障后双馈风机转子励磁电流迅速增大,由于转子变流器存在限流环节使得励磁电流在故障期间一直维持在最大限幅值,并给出了短路电流的计算式。实际上故障期间转子的励磁电流需要通过控制策略进行持续的调节,其特性更加复杂;文献[51]计及了故障期间转子变流器的动态响应特性,认为转子的励磁电流在故障前后不变,并给出了远端故障情况下的双馈风机短路电流表达式。

但上述研究都是认为故障前后转子变流器励磁电流不变,而我国风电并网标准 GB/T 19963—2011《风电场接入电力系统技术规定》^[52]要求,在故障期间双馈风机需要通过低电压穿越控制策略调整转子励磁电流参考值,优先输出无功电流为系统电压提供支撑。为满足并网标准的这一要求,转子变流器励磁需根据电

压跌落程度对励磁进行调节,会使故障前后转子变流器励磁电流发生变化,这将影响双馈风机输出的短路电流特性。

1.2.3 混合型风电场短路电流计算与故障分析方法

现有针对大型风电场短路电流计算方法的研究文献还比较少,已有的研究主要采用基于建立详细时域仿真模型的方法定性分析了大规模风电场对电力系统短路电流水平的影响。

文献[53]采用单机等效风电场模型仿真验证了双馈风电场接入配电网、高压输电网及各种工况下的风电场故障暂态特性。文献[54]以希腊电网为实例,研究了风电接入系统后的暂态过程影响,并仿真分析了各种类型故障下双馈风电场的短路电流特性;文献[55-56]仿真了各类型风电机的最大、最小短路电流情况,并用仿真结果指出各类型风电场的短路电流对系统的影响。

文献[57]将双馈风电场等值为一台等容量的双馈风机,并将Crowbar投入后的双馈风机作为异步发电机处理,计算了双馈风电场的短路电流。文献[58]提出了一种采用等效电势和等效电抗作为特征参数,采用单机等效的双馈风电场短路电流计算简化模型,其实质仍是将Crowbar动作后的双馈发电机作为异步发电机进行短路电流的计算。文献[59-60]利用电气参数和输出功率求取等效风速,建立了一种永磁风电场的单机等效模型,并将其等效为恒功率电流源,计算了永磁风电场的短路电流。

但以上研究均未考虑风电场中风机的多样性,以及故障期间控制策略对短路电流的影响。而目前风电机组普遍具有低电压穿越能力,其在故障期间低电压穿越控制策略将对其短路电流特性造成很大影响;且已有部分混合型风电场在建设过程中装配了双馈、永磁两类机组,这两类风机的短路电流特性存在较大区别^[61-62]。因此,忽略控制策略与风机类型的影响会使风电场短路电流计算产生较大误差,有必要考虑控制策略的影响,提出单台双馈、永磁风电机组的短路电流计算模型,进一步通过简化聚合

等效提出含双馈、永磁风电机组的混合型风电场暂态模型。

关于双馈风电机组短路电流计算方法的研究现状,1.2.2节已有了详细介绍。针对单台永磁风电机组,如图1-2所示,永磁风电机组由于其通过全功率变流器将永磁发电机与电网隔离开来,使电网的电气扰动不会直接影响到永磁发电机,其故障暂态特性主要由并网侧变流器的暂态特性和控制策略所决定,与变流器控制性能、控制方式等因素有关^[63-66]。

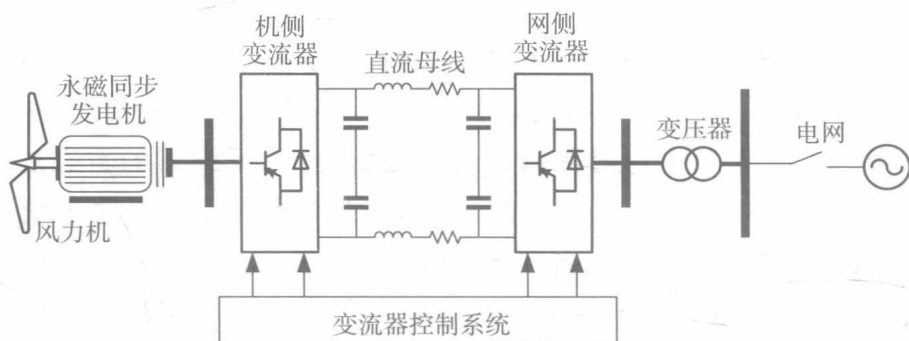


图 1-2 永磁同步风力发电系统的结构图

文献[67]通过仿真结果指出并网变流器可有效隔离故障,使得永磁风电机组的短路电流具有一定程度的可控性。文献[68-69]仿真验证了不同控制策略下永磁风力发电机短路电流存在较大差异。文献[70]仿真分析了故障发生、切除全过程中的暂态特性,并仿真分析了故障位置、所接电网短路容量等因素对永磁风电机组故障电流特性的影响;文献[71]通过仿真分析指出:永磁风电机组由于其变流器控制的限流作用,对电网过流保护的影响较小,并仿真验证了风电接入位置、故障点位置、线路长度及风电接入容量、风电助增电流或分流作用对保护各段定值的影响。上述文献主要通过建立考虑变流器控制策略的详细时域仿真模型来研究控制策略对永磁风机短路电流的影响,还未形成适用于保护原理和整定计算研究的实用永磁风电机组短路电流计算方法。

文献[72-73]将永磁风电机组等效为电流源模型,其模型参数非定值,需根据永磁风机的有功无功输出迭代求得,实质仍然