

# 限幅环节对 DFIG 故障中输出特性的影响研究

薛安成<sup>1</sup>, 耿继瑜<sup>1,2</sup>, 刘瑞煌<sup>1,3</sup>, 赵成爽<sup>1</sup>, 王清<sup>4</sup>, 毕天姝<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 国网上海市电力公司松江供电公司, 上海 201600; 3. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211100;

4. 国网江苏省电力公司苏州供电公司, 江苏 苏州 215000)

**摘要:** 研究了不同严重程度的三相对称故障下, 限幅环节对双馈感应电机(DFIG)输出特性的影响。仿真获得不触发 Crowbar 动作的不同故障下, DFIG 故障中稳态有功输出与稳态电压的关系; 给出 DFIG 功率控制模块中有功功率限幅和转子电流限幅的数学模型, 仿真分析了限幅环节对故障期间 Crowbar 动作次数、暂态有功及无功输出特性的影响。通过理论推导结果与仿真的对比, 表明了故障中稳态有功输出特性由有功限幅、转子电流限幅及额定有功输出限制决定, 且在严重程度不同的故障下, DFIG 故障中功率输出由不同限幅环节决定。

**关键词:** 风电; 有功功率限幅; 转子电流限幅; 故障稳态特性; 故障分析

**中图分类号:** TM 614

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.10.005

## 0 引言

近年来, 我国风电产业增长势头强劲, 其中双馈感应电机 DFIG(Doubly-Fed Induction Generator)在风电场中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。大规模 DFIG 风电机组接入系统, 改变了电力系统的结构, 给电网安全稳定运行带来了新的挑战<sup>[2-5]</sup>。因此, 准确认识风电机组动态特性成为当前研究的热点之一。

另一方面, 在风机控制中, 存在广泛的限幅环节<sup>[6-7]</sup>, 如空气动力模块中有桨距角限幅, 发电机部分有电压、电流限幅和有功功率、无功功率限幅, 变流器中包含着 PI 控制器以及调制器件的限幅等。限幅不仅代表着实际物理设备的能力限制, 也体现了控制系统一些特定的考虑因素。限幅是模型中不可缺少的重要部分, 对限制系统过电流、过电压及保证风电机组安全稳定运行有重要作用。

然而, 值得注意的是, 现有的 DFIG 风电机组动态特性研究主要是对故障后电磁暂态和机电暂态特性的研究<sup>[8-11]</sup>, 且主要集中在不同控制策略对其特性的影响上<sup>[12-14]</sup>。

虽然限幅环节广泛存在于风机系统模型中, 但仅有少数文献涉及限幅模型对于风电系统特性的影响。文献<sup>[15]</sup>探讨了风机中变流器限幅和桨距角限幅导致系统出现切换死区的机理及对动态特性的影响。文献<sup>[16]</sup>分析 DFIG 等值模型时初步涉及了限幅模块, 但未讨论其影响。文献<sup>[17]</sup>研究了不对称电

压跌落下 DFIG 风电机组的无功约束过程。文献<sup>[18]</sup>比较了有无限幅环节对直流电压的影响。总体上, 目前在限幅环节对风电系统特性影响方面的研究较少, 还不够充分。

本文主要研究限幅环节对 DFIG 风电机组故障特性的影响, 着重分析其对 DFIG 故障中稳态有功输出特性的影响。

## 1 故障中稳态的有功输出特性

应用 DIGSILENT 软件, 仿真搭建了某地区实际风电场结构如图 1 所示。

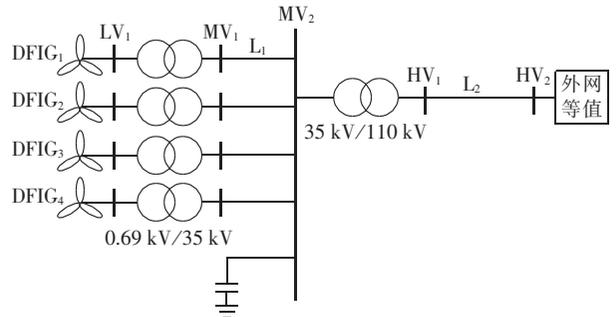


图 1 某外送风电场结构图

Fig.1 Structure of a wind generation system

风电场相关参数如下: 风电机组, DFIG<sub>1</sub>、DFIG<sub>2</sub>、DFIG<sub>3</sub> 为 16×1.5 MW 风机, DFIG<sub>4</sub> 为 18×1.5 MW 风机, 定子漏抗为 0.167 p.u., 转子漏抗为 0.1323 p.u., 励磁电抗为 5.419 p.u., 定子电阻为 0.0084 p.u., 转子电阻为 0.0083 p.u.; 箱式变压器, 容量为 1600 kV·A, 变比为 0.69/35±2×2.5%, 阻抗为 6.5%, 空载电流为 0.6%, 空载损耗为 1.69 kW, 负载损耗为 16.67 kW; 35 kV 集电线(L<sub>1</sub>), 平均长度为 4.25 km, 阻抗为 0.17+j0.365 Ω/km; 升压站主变压器, 容量为 120 MV·A,

收稿日期: 2016-07-06; 修回日期: 2017-06-23

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0902004); 国家自然科学基金资助项目(51477050, 51190103)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2017YFB0902004) and the National Natural Science Foundation of China(51477050, 51190103)

变比为  $35/110 \pm 8 \times 1.25\%$ , 阻抗为  $10.6\%$ , 空载电流为  $0.1\%$ , 空载损耗为  $65.5 \text{ kW}$ , 负载损耗为  $359.2 \text{ kW}$ ;  $110 \text{ kV}$  送出线 ( $L_2$ ), 长度为  $17.55 \text{ km}$ , 阻抗为  $0.07232 + j0.396 \Omega/\text{km}$ ;  $110 \text{ kV}$  母线正序等值阻抗, 最大运行方式下为  $0.01385 + j0.08409 \text{ p.u.}$ , 最小运行方式下为  $0.01511 + j0.16978 \text{ p.u.}$

假设  $1.0 \text{ s}$  时在  $MV_1$  处发生经电阻的三相对称接地故障,  $1.5 \text{ s}$  时故障切除。考虑不同接地电阻  $R$ , 可得故障情况下机端电压和有功输出 (均为标幺值) 变化分别如图 2 和图 3 所示。

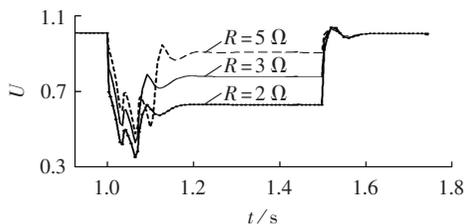


图 2 不同接地电阻下 DFIG<sub>1</sub> 机端电压的变化情况

Fig.2 Terminal voltage of DFIG<sub>1</sub> under different grounding resistances

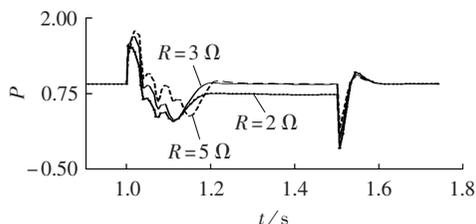


图 3 不同接地电阻下 DFIG<sub>1</sub> 的有功输出

Fig.3 Active power output of DFIG<sub>1</sub> under different grounding resistances

图 2 和图 3 表明, 故障期间, 机端电压  $U$  和有功输出  $P$  在经历一个暂态过程后分别达到稳定值  $U_0$  和  $P_0$ , 其数值基本保持不变, 且该机端电压稳态值和有功输出稳态值随着接地电阻值的减小 (故障程度加重) 而降低。

因此, 通过设置不同接地电阻来控制故障中 DFIG 的机端电压。当接地电阻值较大时, 故障中 DFIG 机端电压较高, 此时转子变流器电流较小, Crowbar 装置不会触发; 当接地电阻值较小时, 故障中 DFIG 机端电压较低, 转子变流器上流过的电流超过阈值, 将会触发 Crowbar 装置。Crowbar 装置动作后, DFIG 的控制系统被屏蔽, 此时 DFIG 输出特性将不再受限幅环节影响, 以类异步机模式运行, 其模型可等效为一台异步机。因此调节本文中的接地电阻值, 控制转子变流器电流始终未达到 Crowbar 装置的动作限值, Crowbar 装置不动作。在此前提下, 通过改变接地电阻值, 获得不同严重程度的故障中稳态有功输出与稳态电压 (均为标幺值) 关系, 如图 4 所示。

图 4 表明, 不触发 Crowbar 动作时, 故障中稳态有功输出  $P_0$  与稳态电压  $U_0$  关系存在 2 个拐点, 分

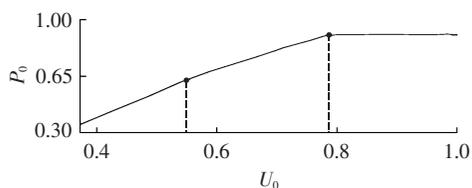


图 4 故障中稳态有功输出与稳态电压关系

Fig.4 Relationship between steady-state active power output and steady-state voltage during fault

别在故障中稳态电压为  $0.7988 \text{ p.u.}$  和  $0.57 \text{ p.u.}$  处。当  $U_0 \geq 0.7988 \text{ p.u.}$ , 即故障较轻时,  $P_0$  与故障前相同; 当  $0.57 \text{ p.u.} < U_0 < 0.7988 \text{ p.u.}$  时,  $P_0$  与  $U_0$  呈近似线性关系; 当  $U_0 \leq 0.57 \text{ p.u.}$  时,  $P_0$  与  $U_0$  同样呈近似线性关系, 但此时的线性系数与前段的线性系数不同。下文重点分析图 4 曲线具有上述近似三段折线关系的机理。

## 2 功率控制模块中的限幅环节

上文分析表明, 故障中稳态有功输出和稳态机端电压近似呈三段折线关系, 该现象与限幅环节有关。DFIG 的控制中包含诸多限幅, 鉴于其功率输出特性主要由功率控制模块决定, 故本文主要研究功率控制模块中的限幅环节对 DFIG 暂态特性的影响, 即有功功率限幅和转子电流限幅环节。

### 2.1 有功功率限幅环节

DFIG 有功控制模块有多种数学模型, 在 IEC 61400-27-1<sup>[19]</sup> 中, 其等效模型如图 5 所示。

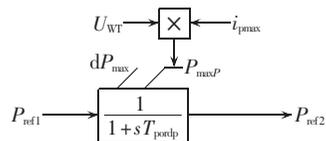


图 5 IEC 标准中 DFIG 有功控制模块

Fig.5 Active power control module of DFIG in IEC standard

图 5 中, 有功功率的限幅包括 2 个方面: 一个是有功功率变化率  $dP_{\max}$  的限制; 另一个是有功功率幅值  $P_{\max P}$  的限制。其中有功功率变化率  $dP_{\max}$  的限制又称作功率恢复缓变率, 为一固定值。有功功率幅值  $P_{\max P}$  为机端电压  $U_{WT}(t)$  和有功电流最大值  $i_{p\max}$  的乘积, 其中  $i_{p\max}$  为固定参数, 其典型值为  $1.47 \text{ p.u.}$ <sup>[2]</sup>, 故有:

$$P_{\max P} = 1.47 U_{WT}(t) \quad (1)$$

其输入与输出的数学描述可写为:

$$P_{\text{ref}2} = \begin{cases} P_{\max P} & P_{\max P} \leq x \\ x & P_{\max P} > x \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{dx}{dt} = \begin{cases} \frac{1}{T_{\text{pordp}}} (P_{\text{ref}1} - x) & \frac{dx}{dt} \leq dP_{\max} \\ dP_{\max} & \frac{dx}{dt} > dP_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

$$x|_{t=0} = P_{\text{ref}1}|_{t=0} \quad (4)$$

其中,  $P_{\text{ref1}}$  为输入变量;  $P_{\text{ref2}}$  为输出变量, 与实际有功输出保持一致;  $x$  为状态变量, 由实际系统决定;  $dP_{\text{max}} = 99 \text{ p.u./s}$  为固定参数, 下同。

进一步, 为考虑控制装置死区等外在因素的限制, DIgSILENT 软件采用图 6 所示模型描述功率控制模块中有功功率的限幅过程。

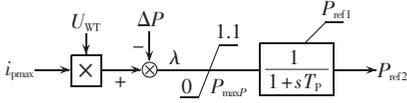


图 6 DIgSILENT 中 DFIG 有功控制模块

Fig.6 Active power control module of DFIG in DIgSILENT

其数学描述如下:

$$P_{\text{ref2}} = \begin{cases} P_{\text{ref1}} & P_{\text{ref2}} \leq x \\ x & P_{\text{ref2}} > x \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{T_p} (P_{\text{max}P} - x) \quad (6)$$

$$x|_{t=0} = P_{\text{max}P}|_{t=0} \quad (7)$$

$$P_{\text{max}P} = \begin{cases} 0 & \lambda \leq 0 \\ \lambda & 0 < \lambda < 1.1 \\ 1.1 & \lambda \geq 1.1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\lambda = i_{\text{pmax}} U_{\text{WT}}(t) - \Delta P \quad (9)$$

其中,  $\lambda$  为中间变量;  $i_{\text{pmax}}$  取值为  $1.46154 \text{ p.u.}$  (与上文  $1.47 \text{ p.u.}$  接近);  $\Delta P$  为功率偏移量, 取值为  $0.16923 \text{ p.u.}$

从安全裕度考虑, 有功功率最大限幅值  $P_{\text{max}P}$  限定在  $0 \sim 1.1$  之间, 当  $U_{\text{WT}}(t) \geq 0.8684 \text{ p.u.}$  时,  $P_{\text{max}P} = 1.1$ ; 当  $0.1158 \text{ p.u.} < U_{\text{WT}}(t) < 0.8684 \text{ p.u.}$  时,  $P_{\text{max}P}$  与  $U_{\text{WT}}(t)$  呈线性关系, 此时曲线的斜率与 IEC 模型算法中有功限幅曲线的斜率基本一致; 当  $U_{\text{WT}}(t) \leq 0.1158 \text{ p.u.}$  时,  $P_{\text{max}P} = 0$ 。后续讨论中采用 DIgSILENT 模型中的有功限幅算法。

## 2.2 转子电流限幅环节

对于 DFIG, 在电网电压定向的矢量控制下, 忽略定子电阻  $R_s$  的影响, 可得 DFIG 定子输出有功功率如下:

$$P_s \approx \frac{L_m}{L_s} i_{\text{rd}}(t) U_{\text{WT}}(t) \quad (10)$$

其中,  $L_m$  为励磁电感;  $L_s$  为定子自感;  $i_{\text{rd}}$  为转子电流  $d$  轴分量。

进一步, 风电机组向电网输出的有功功率如下:

$$P_g = (1-s)P_s \approx (1-s) \frac{L_m}{L_s} i_{\text{rd}}(t) U_{\text{WT}}(t) \quad (11)$$

其中,  $s$  为运行转差。式(11)表明, 当转速基本不变时, 风电机组向电网输出的有功功率  $P_g$  与转子电流  $d$  轴分量  $i_{\text{rd}}$  和机端电压  $U_{\text{WT}}$  的乘积近似呈正比。

由于故障时间较短, 故障期间转速可视为恒定值, 即  $s$  为一常数。故障过程中, DFIG 机端电压降

低, 转子电流增大, 可能达到其极限幅值  $i_r^{\text{max}}$ , 此时转子电流的  $d$  轴分量  $i_{\text{rd}}$  也达到极限值  $i_{\text{rd}}^{\text{max}}$ 。当转子电流限幅起作用时, 风电机组向电网输出的有功功率如下:

$$P_{\text{max}i_{\text{rd}}} \approx (1-s_0) \frac{L_m}{L_s} i_{\text{rd}}^{\text{max}} U_{\text{WT}}(t) \quad (12)$$

其中,  $P_{\text{max}i_{\text{rd}}}$  为转子电流限幅下 DFIG 所能达到的最大有功输出;  $s_0$  为稳态的转差率。显然, 同一机端电压下, 转子电流  $d$  轴分量的极限幅值  $i_{\text{rd}}^{\text{max}}$  取值越大, 有功功率的极限值越大。

## 3 限幅对故障中输出动态特性的影响

利用 DIgSILENT 软件仿真分析限幅环节对系统故障中动态输出功率的影响。仿真采用图 1 所示等效模型系统, 考虑系统在  $MV_1$  处发生三相经电阻  $R$  的接地故障。Crowbar 装置设定如下: 若转子电流超过  $1.47 \text{ p.u.}$ , 则触发 Crowbar 投入  $0.03 \text{ s}$ 。对比分析考虑/不考虑有功功率限幅和转子电流限幅对 DFIG 功率输出特性的影响。仿真中考虑如下 4 种模型: 模型①, 无限幅环节作用; 模型②, 仅存在有功功率限幅; 模型③, 仅存在转子电流限幅; 模型④, 有功功率与转子电流限幅同时存在。

考虑上述 4 种模型, 可得在接地电阻  $R = 2.4 \Omega$  故障下动态无功和有功功率输出分别见图 7 和图 8。

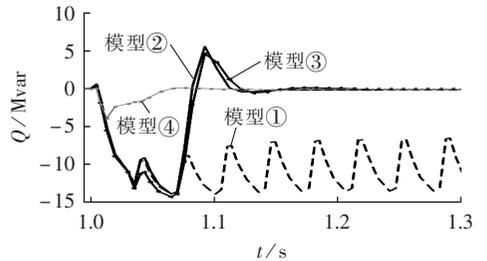


图 7 限幅环节对无功输出的影响

Fig.7 Impact of limiter on reactive power output

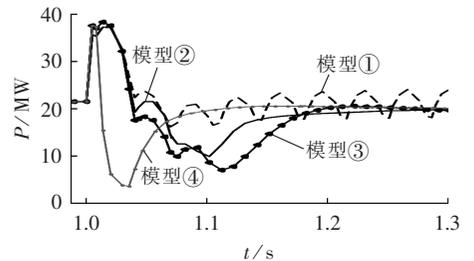


图 8 限幅环节对有功输出的影响

Fig.8 Impact of limiter on active power output

图 7 和图 8 表明, 故障期间, 模型①中, 无功输出和有功输出均出现大幅振荡, 振荡频率与 Crowbar 装置的投切频率一致。这是因为故障期间无限幅作用时转子电流超过 Crowbar 装置整定值, 造成 Crowbar 装置频繁投切, 使得 DFIG 不断在感应电机和异步电

机间频繁切换。这导致了模型①中风电机组从系统吸收大量无功功率,且无功功率不断波动。在模型②和③中,限幅作用有效减少了故障期间的转子电流,Crowbar 装置的投切次数减少。模型④因同时存在有功功率限幅与转子电流限幅环节,转子电流受到双重限制未达到 Crowbar 装置的动作限值,Crowbar 装置不动作。即采用限幅环节可减少模型中 Crowbar 装置的投切次数。

图 7 表明,从无功角度看,模型②和③中,系统在故障发生初期会吸收较多无功功率,故障中的稳态时期,无功功率为 0;模型④中,故障期间的无功功率几乎为 0,与故障前保持一致。因此,模型中采用限幅环节可抑制故障中稳态无功的吸收和波动。

图 8 表明,从有功角度看,模型②和③中,系统在故障发生初期有功输出呈现一定的波动,故障中的稳态时期波动较小;模型④中,有功输出波动幅度非常小。因此,模型中采用限幅环节可有效抑制故障中稳态有功输出的波动。

上述对比分析表明,在模型中引入限幅环节,可在故障中有效减少 Crowbar 装置的投切次数,减少风电机组吸收的无功功率,同时抑制功率输出的波动。

#### 4 故障中稳态有功输出的决定因素分析

下面重点研究限幅环节对故障中稳态有功输出特性的影响。

考虑限幅环节影响,由式(8)和(9)可得有功功率限幅下最大有功输出  $P_{\max P}$  和故障严重程度(电压跌落)的关系曲线,如图 9 中点划线所示;同样,由式(12)可获得转子电流限幅下最大有功输出  $P_{\max i_{rd}}$  和故障严重程度(电压跌落)的关系曲线,如图 9 中点线所示。进一步,考虑系统额定有功输出  $P_{\text{refl}}$  的限制,可得到包括有功功率限幅、转子电流限幅、额定有功输出限制(见图 9 中双点划线)的限幅包络线,由图 9 中 a、b、c 段曲线组成。同时,由第 1 节仿真可获得不同故障严重程度(电压跌落)下 DFIG 的稳态有功输出,如图 9 中实线所示。

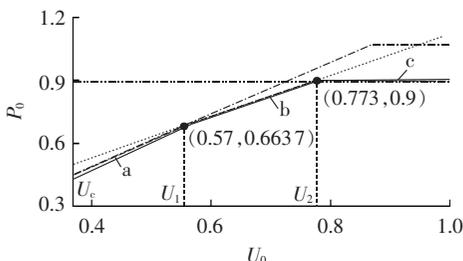


图 9 故障中稳态有功输出与稳态电压关系特性  
Fig.9 Relationship between steady-state active power output and steady-state voltage during fault

图 9 表明,在满足 Crowbar 不投入的情形下,故障稳态时期仿真获得的实际有功输出曲线与经有功

限幅  $P_{\max P}$ 、转子电流限幅  $P_{\max i_{rd}}$  及额定输出限制  $P_{\text{refl}}$  后的限幅包络线相一致。因此,可认为该限幅包络线上  $U_1$ 、 $U_2$  处所对应的点即本文第 1 节中所要探索的非线性拐点;故障后稳态有功输出特性由有功限幅  $P_{\max P}$ 、转子电流限幅  $P_{\max i_{rd}}$  及额定输出限制  $P_{\text{refl}}$  确定。

进一步,可得限幅包络线数学表达式如下:

$$P_{\text{ref}2} = \begin{cases} i_{\text{pmax}} U_0(t) - \Delta P & U_c \leq U_0(t) < U_1 \\ (1-s_0) \frac{L_m}{L_s} i_{\text{rd}}^{\text{max}} U_0(t) & U_1 \leq U_0(t) < U_2 \\ P_{\text{ref}1} & U_0(t) \geq U_2 \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $U_c$  为触发 Crowbar 装置投入所对应的故障中稳态机端电压值;  $U_1$  为有功功率限幅与转子电流限幅曲线相交处的机端电压值;  $U_2$  为使有功功率以额定值输出的最小机端电压值。

式(13)反映了限幅环节和故障中稳态电压  $U_0$  对 DFIG 故障中稳态有功功率输出的影响机理。即:当  $U_c \leq U_0 < U_1$  时,有功输出由有功限幅环节决定,即为图 9 中限幅包络线的 a 段;当  $U_1 \leq U_0 < U_2$  时,有功输出由转子电流限幅环节决定,即为图 9 中限幅包络线的 b 段;当  $U_0 \geq U_2$  时,有功输出为额定有功输出,即为图 9 中限幅包络线的 c 段。

#### 5 结论

本文研究了在不同严重程度的三相对称故障下,限幅环节对 DFIG 故障中输出特性,特别是稳态有功输出特性的影响机理。其主要影响如下。

a. 故障过程中,限幅环节可以有效减少 Crowbar 装置的投切次数,减少风电机组吸收的无功功率,同时抑制功率输出的波动。

b. 在不触发 Crowbar 装置的情形下,DFIG 故障中的稳态有功输出和稳态机端电压近似呈三段折线关系,分别由功率控制模块中的有功功率限幅环节、转子电流限幅环节和额定有功功率决定。

c. 对于严重程度不同的故障,风机的有功输出特性不同。当故障较轻时,DFIG 通过功率控制保持其额定有功输出;当故障程度加重时,DFIG 稳态有功输出受转子电流限幅环节约束;当故障程度进一步加重时,DFIG 稳态有功输出受有功功率限幅环节约束;当故障很严重时,会引起 Crowbar 投入,DFIG 的控制环节被屏蔽,风机运行在类异步机模式。

研究揭示了在不同严重程度的故障下,DFIG 故障中功率输出受到不同限幅环节影响的机理,可为更准确地描述 DFIG 暂态特性、为含风电的电力系统建模及相关的故障分析与控制提供理论参考。

另一方面,本文研究含诸多假设,且未考虑风机厂商控制策略和限幅环节的不同。因此,针对不同型号的风机,仍需进一步研究其限幅环节对风机输出的影响。

## 参考文献:

- [1] AKHMATOV V. 风力发电用感应发电机[M]. 本书翻译组,译. 北京:中国电力出版社,2009:1-10.
- [2] 贺益康,胡家兵,Lie XU. 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京:中国电力出版社,2011:2-13.
- [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,2012,32(2):1-8.  
ZHANG Baohui,LI Guanghui,WANG Jin,et al. Affecting factors of grid-connected wind power on fault current and impact on protection relay[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(2):1-8.
- [4] 蒋长江,刘俊勇,刘友波,等. 计及风电随机激励的电力系统暂态稳定分析[J]. 电力自动化设备,2016,36(3):100-108.  
JIANG Changjiang,LIU Junyong,LIU Youbo,et al. Transient stability analysis of power system considering wind-power stochastic excitation[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(3):100-108.
- [5] 金海峰,吴涛. 风电接入系统后的电压稳定问题[J]. 电力自动化设备,2010,30(9):82-84.  
JIN Haifeng,WU Tao. Voltage stability after grid-connection of wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(9):82-84.
- [6] ELLIS A,MULJADI E. Wind power plant representation in large-scale power flow simulations in WECC[C]//Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh,USA:IEEE,2008:1-6.
- [7] ELLIS A,POURBEIK P,SANCHEZ-GASCa J J,et al. Generic wind turbine generator models for WECC-a second status report[C]//Power & Energy Society General Meeting. Denver,USA:IEEE,2015:1-5.
- [8] 张保会,李光辉,王进,等. 风电接入对继电保护的影响(二)——双馈式风电场电磁暂态等值建模研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):1-7.  
ZHANG Baohui,LI Guanghui,WANG Jin,et al. Impact of wind farm integration on relay protection(2):DFIG-based wind farm electromagnetic transient equivalent model[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):1-7.
- [9] 张文娟,马浩森,张国慨,等. 基于转子串联电阻的双馈风力发电机低电压穿越[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):28-33.  
ZHANG Wenjuan,MA Haomiao,ZHANG Guokai,et al. Low voltage ride-through of doubly-fed induction generator based on rotor series resistor[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):28-33.
- [10] 瞿鹏,周孝信,安宁,等. 提高双馈式风力发电机机电暂态模型 Crowbar 保护仿真精度的方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(6):1322-1328.  
ZI Peng,ZHOU Xiaoxin,AN Ning,et al. A method of improving the accuracy of doubly-fed wind generator electromechanical transient model with Crowbar protection[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(6):1322-1328.
- [11] 顾卓远,汤涌,刘文焯,等. 双馈风力发电机组的电磁暂态-机电暂态混合仿真研究[J]. 电网技术,2015,39(3):615-620.  
GU Zhuoyuan,TANG Yong,LIU Wenzhuo,et al. Electromechanical transient-electromagnetic transient hybrid simulation of doubly-fed induction generator[J]. Power System Technology,2015,39(3):615-620.
- [12] 赵卓立,杨苹,蔡泽祥,等. 含风电孤立中压微电网暂态电压稳定协同控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):1-9.  
ZHAO Zhuoli,YANG Ping,CAI Zexiang,et al. Cooperative control of transient voltage stability for islanded medium-voltage microgrid with wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(10):1-9.
- [13] 侯俊贤,陶向宇,张静,等. 基于低电压穿越控制策略的风电场等值方法[J]. 电网技术,2015,39(5):1281-1286.  
HOU Junxian,TAO Xiangyu,ZHANG Jing,et al. A low-voltage ride-through control strategy based equivalence method for wind farms[J]. Power System Technology,2015,39(5):1281-1286.
- [14] 陈波,吴政球. 基于约束因子限幅控制的双馈感应发电机有功功率平滑控制[J]. 中国电机工程学报,2011,31(27):130-137.  
CHEN Bo,WU Zhengqiu. Power smoothing control strategy of doubly-fed induction generator based on constraint factor extent-limit control[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(27):130-137.
- [15] HISKENS I A. Dynamics of type-3 wind turbine generator models[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(1):465-474.
- [16] 李治艳. 双馈风力发电机降阶模型研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.  
LI Zhiyan. The study of reduced order model for doubly-fed wind power generator[D]. Beijing:North China Electric Power University,2014.
- [17] 丘晓明,赵斌,王玲玲,等. 不对称电压跌落下双馈风电机组无功极限分析[J]. 可再生能源,2013,31(6):43-46.  
QIU Xiaoming,ZHAO Bin,WANG Lingling,et al. Reactive power capability analysis of doubly-fed induction generators under unbalanced grid voltage drop conditions[J]. Renewable Energy,2013,31(6):43-46.
- [18] 汪万伟,尹华杰,管霖. 双闭环矢量控制的电压型 PWM 整流器参数整定[J]. 电工技术学报,2010,25(2):67-72.  
WANG Wanwei,YIN Huajie,GUAN Lin. Parameter setting for double closed-loop vector control of voltage source PWM rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(2):67-72.
- [19] IEC. Wind turbines-part 27-1:electrical simulation models-wind turbines:IEC61400-27-1[S]. [S.l.]:IEC,2015.

## 作者简介:



薛安成

薛安成(1979—),男,江苏常熟人,教授,博士,主要研究方向为新能源电力系统建模和稳定性分析(E-mail:acxue@ncepu.edu.cn);

耿继瑜(1990—),女,河北承德人,硕士,主要研究方向为新能源电力系统稳定性分析(E-mail:jyugeng@163.com);

刘瑞煌(1992—),男,福建宁德人,硕士,主要研究方向为电力系统稳定性与控制(E-mail:pianoboyliu@163.com);

赵成爽(1993—),女,吉林延边人,硕士研究生,主要研究方向为新能源电力系统稳定性分析(E-mail:hdzhaocs@163.com);

王清(1989—),男,江西吉安人,博士,主要研究方向为新能源电力系统稳定性分析与控制(E-mail:carowangqing@sina.com);

毕天姝(1973—),女,河南济源人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统继电保护与控制、广域同步相量测量技术及其应用、故障诊断(E-mail:tsbi@ncepu.edu.cn)。

(下转第 56 页 continued on page 56)

## Analysis and comparison of dual-active-bridge DC/DC converters in DC distribution network

SUN Qianhao<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, SONG Qiang<sup>1</sup>, ZHAO Biao<sup>1</sup>, LI Jianguo<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** A phase-shift control with dead time is applied in capacitor-buffer dual-active-bridge DC/DC converter. By comparing the switching characteristic of DAB (Dual-Active-Bridge) DC/DC converter with and without buffer capacitor, the impacts of buffer capacitor on high frequency link waveform, power transmission, and circling power characteristic are obtained. Then, the transmission power and power factor expression for the two topologies are deduced, and the relation and difference between them are achieved. The value of buffer capacitor is analyzed theoretically, and the selection method of buffer capacitor is proposed. Results of simulation and prototype experiment verify the effectiveness of the proposed theory and control strategy.

**Key words:** DC distribution network; dual-active-bridge DC/DC converter;  $du/dt$ ; soft switching; buffer capacitor; circling power

(上接第 33 页 continued from page 33)

## Impact of limiter on output characteristics of DFIG during fault

XUE Ancheng<sup>1</sup>, GENG Jiyu<sup>1,2</sup>, LIU Ruihuang<sup>1,3</sup>, ZHAO Chengshuang<sup>1</sup>, WANG Qing<sup>4</sup>, BI Tianshu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Songjiang Power Supply Company of

Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 201600, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211100, China;

4. State Grid Suzhou Power Supply Company of Jiangsu Electric Power Company, Suzhou 215000, China)

**Abstract:** The impact of the limiter on the output characteristic of DFIG (Doubly-Fed Induction Generator) during three-phase symmetrical faults with different severity is researched. The relationship between the steady-state active power output and steady-state voltage of DFIG during different faults without triggering the action of Crowbar is obtained by simulations. The mathematical models for the active power limit and the rotor current limit in DFIG power control module are respectively presented, and the impacts of the amplitude limiters on the Crowbar action and the characteristics of active and reactive power outputs during fault are analyzed by simulations. The comparison between theoretical and simulative results shows that the characteristics of steady-state active power output during fault is determined by the active power limit, the rotor current limit and the rated active power output limit, and the output power is determined by different limiters under faults with different severities.

**Key words:** wind power; active power limit; rotor current limit; steady-state characteristics during fault; failure analysis