

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190252

双馈风机控制方式对继电保护影响的研究

于淼, 汤亚芳, 黄亦欣, 李君卫, 冒国龙

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 双馈风机(DFIG)的接入会影响配电网继电保护的正确动作, 其中控制策略的影响不可忽视。基于 DFIG 两相静止坐标系下的数学模型, 分别建立了 DFIG 机侧变流器的矢量控制和直接功率控制的模型。理论分析表明当电网发生短路故障时, 不同控制策略下的 DFIG 短路特性有着较大差异, 从而对继电保护造成不利影响。从仿真结果可知, 直接功率控制响应速度快, 超调量大; 矢量控制响应速度慢, 超调量小; DFIG 出口处电压下降越多, 两种控制方式瞬间提供的短路电流差别越大。最后采用向转子电流参考指令中加补偿项的方法对机侧变流器矢量控制进行改进。仿真分析结果验证了改进后的矢量控制能有效地减少 DFIG 在故障期间对继电保护的不利影响。

关键词: 双馈风机; 矢量控制; 故障; 电流保护; 变流器

Research on the influence of control mode of DFIG on relay protection

YU Miao, TANG Yafang, HUANG Yixin, LI Junwei, MAO Guolong

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The access of DFIG will affect the correct action of relay protection in the distribution network, and the influence of control strategy cannot be ignored. In this paper, based on the mathematical model of DFIG two-phase static coordinate system, the vector control model and the direct power control model of DFIG side converter are established respectively. Theoretical analysis shows that when a short-circuit fault occurs in the power grid, DFIG short-circuit characteristics under different control strategies have great differences, thus causing adverse effects on the relay protection. Simulation results show that the direct power control has fast response speed and large overshoot. The response speed of vector control is slow and the overshoot is small. The more voltage drops at the outlet of DFIG, the greater the difference is in short circuit current provided by the two control modes in an instant. At last, the vector control of the converter on the machine side is improved by adding a compensation term to the rotor current reference instruction. Simulation analysis results show that the improved vector control could effectively reduce the adverse effect of DFIG on the relay protection during the fault.

This work is supported by Joint Fund Project of Guizhou Province (No. LH[2017]7231).

Key words: DFIG; vector control; fault; current protection; converter

0 引言

分布式电源的接入改变了配电网的结构、系统功率流分布、短路电流及流向, 对电力系统继电保护带来了一些不利影响^[1]。风电作为分布式电源的一种重要形式, 近年来规模不断扩大、容量比例不断提高^[2]。DFIG 是风电机组的重要类型, 含有大量的电力电子设备, 有着比较特殊的运行方式以及复杂的控制策略^[3], 与传统的同步发电机在故障特征和运行条件上有着较大区别。为了确保 DFIG 大规模

接入并安全稳定运行, 有必要研究其对现有保护的影响, 寻求可靠的继电保护解决方案。

目前, DFIG 对继电保护影响的研究主要集中在: (1) DFIG 短路特性分析。文献[4-7]分析了双馈风电机组故障时短路电流计算方法以及短路特性, 证明了风电场对系统提供的短路电流会对变压器等设备产生影响, 不容忽视。(2) DFIG 接入对电流保护影响因素的分析。文献[8-11]分析了风机容量与运行工况、并网位置等对配电网中电流保护整定的影响; 文献[12-13]研究了不同的控制策略下的 DFIG 短路电流特性, 但没有分析对保护的影响。(3) 传统保护改进方案和新的保护方案的提出。文献[14]针

基金项目: 贵州省联合基金项目资助(LH[2017]7231)

对风电接入后提出了自适应电流保护新算法, 文献[15-16]提出了加装方向元件弥补传统电流保护的无方向性的缺陷。

本文对不同控制策略下 DFIG 的短路特性及对继电保护的影响展开系统分析和研究。分别建立矢量控制策略和直接功率控制策略的 DFIG 模型, 分析电网发生短路故障时, 基于不同控制策略的双馈风机的短路电流特性及对继电保护的影响。改进机侧变流器矢量控制策略抑制转子电流, 从而减少 DFIG 在故障期间对继电保护的影响。

1 DFIG 的数学模型

DFIG 是一个高阶非线性系统, 求解十分困难。忽略风机内部损耗, DFIG 的定、转子绕组分别在定子两相静止坐标系和转子两相静止坐标系下的电压方程为^[17]

$$\begin{cases} u_s = r_s i_s + \frac{d}{dt} \psi_s \\ u_r = r_r i_r + \frac{d}{dt} \psi_r \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_s 、 u_r 分别为定、转子电压; i_s 、 i_r 分别为定、转子电流; ψ_s 、 ψ_r 分别为定、转子磁链; r_s 、 r_r 分别为定、转子绕组等效电阻。

因为转子坐标系下变量相对于定子坐标系中的变量以转速 ω_r 转动, ω_r 为转子旋转角速度, 所以选择定子绕组两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系为参考时, 得到 DFIG 的电压方程为

$$\begin{cases} u_s = r_s i_s + \frac{d}{dt} \psi_s \\ u_r = r_r i_r - j\omega_r \psi_r + \frac{d}{dt} \psi_r \end{cases} \quad (2)$$

磁链方程为^[18-19]

$$\begin{cases} \psi_s = L_s i_s + L_m i_r \\ \psi_r = L_r i_r + L_m i_s \end{cases} \quad (3)$$

式中: L_s 为等效定子绕组全自感; L_m 为等效定子绕组与等效转子绕组间互感; L_r 为等效转子绕组全自感。

2 DFIG 的控制策略

DFIG 机侧变流器的控制主要是为了实现 DFIG 输出有功功率和无功率的解耦^[20]。网侧变流器主要是控制直流母线侧的电压恒定, 以保持机侧输入输出功率的平衡。本文主要分析机侧变流器的不同控制策略对保护产生的影响。

DFIG 机侧变流器, 主要控制目标为: 一是控

制 DFIG 的有功功率, 保证最大风能追踪与机组变速恒频运行; 二是控制 DFIG 无功功率, 以此保证并网运行的稳定性。

2.1 矢量控制

当机侧变流器采用定子磁链定向的矢量控制时, 即同步旋转坐标系的 d 轴定向于定子磁链矢量 ψ_s , $\psi_{ds} = \psi_s$, $\psi_{qs} = 0$, 同步旋转 dq 坐标系中的磁链方程如式(4)^[21-22]所示。

$$\begin{cases} \psi_s = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ 0 = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ψ_{ds} 、 ψ_{qs} 、 ψ_{dr} 和 ψ_{qr} 分别为定子磁链、转子磁链的 dq 轴分量; i_{ds} 、 i_{qs} 、 i_{dr} 和 i_{qr} 分别为定子电流、转子电流的 dq 轴分量。

同步旋转 dq 坐标系中的电压方程为^[23]

$$\begin{cases} u_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \psi_{ds} - \omega_1 \psi_{qs} \\ u_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \psi_{qs} + \omega_1 \psi_{ds} \\ u_{dr} = r_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \psi_{dr} - \omega_s \psi_{qr} \\ u_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \psi_{qr} + \omega_s \psi_{dr} \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_{ds} 、 u_{qs} 、 u_{dr} 和 u_{qr} 分别为定子电压、转子电压 dq 轴分量; ω_s 为转差角速度; ω_1 为同步转速。

根据式(4)和式(5)可得定子有功功率和无功率率表达式为^[13]

$$\begin{cases} P_s = -\text{Re} \left[\frac{3}{2} U_s \hat{I}_s \right] \approx \frac{3L_m}{2L_s} \omega_1 \psi_s i_{qr} \\ Q_s = -\text{Im} \left[\frac{3}{2} U_s \hat{I}_s \right] \approx \frac{3L_m}{2L_s} \omega_1 \psi_s \left(i_{dr} - \frac{\psi_s}{L_m} \right) \end{cases} \quad (6)$$

根据式(4)和式(5), 定子磁链恒定且导数为 0, 消去定子电流有:

$$\begin{cases} u_{dr} = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s} \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_s \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s} i_{qr} + r_r i_{dr} \\ u_{qr} = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s} \frac{di_{qr}}{dt} + \omega_s \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s} i_{dr} + r_r i_{qr} + \omega_s \frac{L_m}{L_s} \psi_s \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{令} \begin{cases} u'_{dr} = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s} \frac{di_{dr}}{dt} + r_r i_{dr} = \left(k_{dr1} + \frac{k_{dr2}}{s} \right) (i_{dr}^* - i_{dr}) \\ u'_{qr} = \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s} \frac{di_{qr}}{dt} + r_r i_{qr} = \left(k_{qr1} + \frac{k_{qr2}}{s} \right) (i_{qr}^* - i_{qr}) \end{cases}$$

有:

$$\begin{cases} u_{dt} = \left(k_{dt1} + \frac{k_{dt2}}{s}\right)(i_{dt}^* - i_{dt}) - \omega_s \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s} i_{qr} \\ u_{qr} = \left(k_{qr1} + \frac{k_{qr2}}{s}\right)(i_{qr}^* - i_{qr}) + \omega_s \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s} i_{dt} + \omega_s \frac{L_m}{L_s} \psi_s \end{cases} \quad (8)$$

式中: i_{dt}^* 、 i_{qr}^* 为转子电流参考值的 dq 轴分量; k_{dt1} 、 k_{dt2} 、 k_{qr1} 和 k_{qr2} 为转子电流环 dq 轴比例、积分系数。

根据式(6), 功率外环表示为

$$\begin{cases} i_{dt}^* = \left(k_{dt3} + \frac{k_{dt4}}{s}\right)(Q_s^* - Q_s) \\ i_{qr}^* = \left(k_{qr3} + \frac{k_{qr4}}{s}\right)(P_s^* - P_s) \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_s^* 、 Q_s^* 为有功功率和无功功率的参考值; k_{dt3} 、 k_{dt4} 、 k_{qr3} 和 k_{qr4} 分别为功率环 dq 轴比例、积分系数。

根据式(8)、式(9)可得同步速旋转 dq 坐标系下机侧变流器矢量控制原理框图, 如图 1 所示。

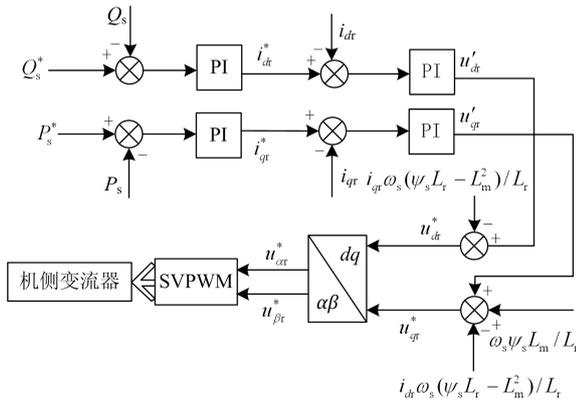


图 1 矢量控制原理框图

Fig. 1 Block diagram of vector control principle

为了完成定子输出功率的控制, 采用电流内环和功率外环控制器相结合, 将转子励磁电流闭环控制器作为系统内环, 同时建立定子输出功率与转子电流关系的功率外环, 内外环的结合组成整个系统的控制结构。功率闭环控制器可以确定转子电流的指令值, 同时检测到转子电流反馈值, 并将两者之间的差通过 PI 调节得到转子电压指令。增加电压补偿项, 经变换和调制实现 DFIG 定子侧的稳定输出。

2.2 直接功率控制

当机侧变流器采用基于定子磁链定向的直接功率控制时, 由式(4)一式(6), 定子磁链恒定且导数为 0, 消去定子和转子电流可得:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{qr}}{dt} = \frac{2}{3} \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s \omega_1 \psi_s} \frac{dP_s}{dt} \\ \frac{d\psi_{dr}}{dt} = \frac{2}{3} \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_s \omega_1 \psi_s} \frac{dQ_s}{dt} \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)和式(4)整理并代入式(5), 并令 $U_s = \omega_1 \psi_s$ 可得^[13]:

$$\begin{cases} u_{dr} = \frac{2}{3} \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_m U_s} \frac{dQ_s}{dt} - \frac{2}{3} \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_m} \frac{\omega_s}{U_s} P_s + \frac{2}{3} \frac{L_s r_r}{L_m U_s} Q_s + \frac{r_r}{L_m} \psi_s \\ u_{qr} = \frac{2}{3} \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_m U_s} \frac{dP_s}{dt} + \frac{2}{3} \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_m} \frac{\omega_s}{U_s} Q_s + \frac{2}{3} \frac{L_s r_r}{L_m U_s} P_s + \omega_s \frac{L_r}{L_m} \psi_s \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} u_{dr}' = \frac{2}{3} \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_m U_s} \frac{dQ_s}{dt} + \frac{2}{3} \frac{L_s r_r}{L_m U_s} Q_s = \left(k_{dt5} + \frac{k_{dt6}}{s}\right)(Q_s^* - Q_s) \\ u_{qr}' = \frac{2}{3} \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_m U_s} \frac{dP_s}{dt} + \frac{2}{3} \frac{L_s r_r}{L_m U_s} P_s = \left(k_{qr5} + \frac{k_{qr6}}{s}\right)(P_s^* - P_s) \end{cases}, \text{ 则有:}$$

$$\begin{cases} u_{dt} = \left(k_{dt5} + \frac{k_{dt6}}{s}\right)(Q_s^* - Q_s) - \frac{2}{3} \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_m} \frac{\omega_s}{U_s} P_s + \frac{r_r}{L_m} \psi_s \\ u_{qr} = \left(k_{qr5} + \frac{k_{qr6}}{s}\right)(P_s^* - P_s) + \frac{2}{3} \frac{L_s L_r - L_m^2}{L_m} \frac{\omega_s}{U_s} Q_s + \omega_s \frac{L_r}{L_m} \psi_s \end{cases} \quad (12)$$

式中, k_{dt5} 、 k_{dt6} 、 k_{qr5} 和 k_{qr6} 分别为功率环 dq 轴比例、积分系数。

根据式(12)可得同步速旋转 dq 坐标系下基于定子磁链定向的机侧变流器原理框图, 如图 2 所示。

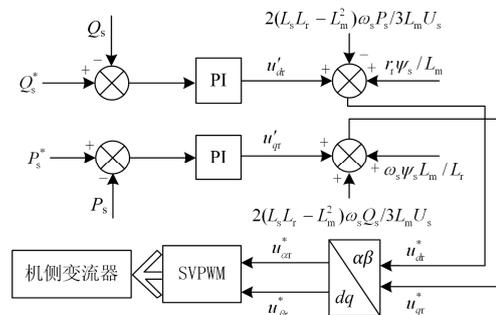


图 2 直接功率控制原理框图

Fig. 2 Principle block diagram of direct power control

直接功率控制采用的是一个功率环控制, 功率闭环控制器可以直接得到转子电压指令, 实现 DFIG 定子侧的稳定输出。

3 不同控制策略的短路特性及对保护的影响

3.1 不同控制策略的短路特性

对比机侧变流器的矢量控制策略和直接功率控制策略原理图: 矢量控制策略采用双控制回路, 外回路是功率, 内回路是转子电流。直接功率控制策略采用单个控制回路, 即功率回路。

相比之下, 直接功率控制消除了电流控制回路, 简化了控制结构, 因此, 直接功率控制直接使用 PI 调节器调节瞬时有功、无功功率, 响应速度很快。当三相对称短路故障导致端电压下降时, 出现功率偏差, 矢量控制采用双回路结构, 调节速度慢, 响应时间长, 但超调量小, 而单回路的直接功率控制迅速调节会引起较大的超调量, 但调节时间缩短。因此, 直接功率控制策略提供的短路电流瞬时值大于矢量控制。

3.2 不同控制策略对保护的影响

当电网发生短路故障时, DFIG 的转子磁链与变流器控制方式有关。变流器控制方式不同, DFIG 提供的短路电流也不同。当短路故障发生点位于 DFIG 下游时, DFIG 有助增电流作用, 下游线路保护范围扩大, 变流器采用直接功率的控制方式, DFIG 瞬时提供的短路电流相对较大, 可能会引起下游保护误动; 短路故障发生点位于 DFIG 上游时, 采用直接功率的 DFIG 瞬时提供的电流较大, 经过上游保护, 可能导致上游保护误动。

如图 3 所示配电网, 若 DFIG 从 B 点连接到配电网, CD 线路首端 k_1 点处发生三相短路故障时, 采用直接功率控制的 DFIG 瞬时提供的短路电流会比采用矢量控制时提供的短路电流大, 可能导致保护 H_2 的 I 段发生误动。若 DFIG 从 C 点连接到配电网, AB 线路末端 k_2 点处发生三相短路故障, 受 DFIG 作用的影响, 流过保护 H_2 的电流增大, 并且

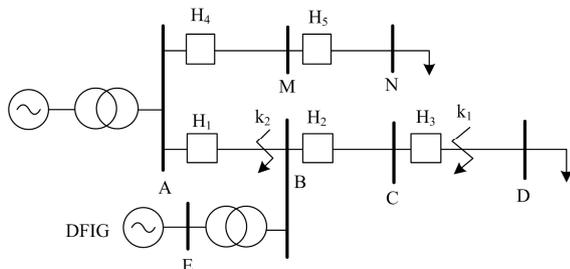


图 3 DFIG 接入配电网

Fig. 3 DFIG is connected to the distribution network

直接功率控制的瞬时短路电流较大, 可能导致保护 H_2 的 I 段误动。

3.3 仿真分析

基于 Matlab 仿真平台建立的仿真模型如图 3 所示, DFIG 接入 25 kV 配电网络, 线路 AB、BC、CD、AM、MN 的参数为 $R_1=0.1153 \Omega/\text{km}$ 、 $X_1=0.0011 \text{ H}/\text{km}$, 长度分别为 80 km、70 km、50 km、100 km、80 km, 母线 N 末端负荷为 1.2 MW, 母线 D 末端负荷阻抗为 2.3 MW, DFIG 的参数如表 1。

表 1 单台 DFIG 参数

Table 1 Single DFIG parameters

参数	数值	参数	数值
额定功率/MW	1.5	定子漏感标幺值	0.18
定子电压/V	575	定转子互感标幺值	2.9
额定频率/Hz	50	转子电阻标幺值	0.016
极对数	3	转子漏感标幺值	0.16
定子电阻标幺值	0.023	直流侧电压/V	1 150

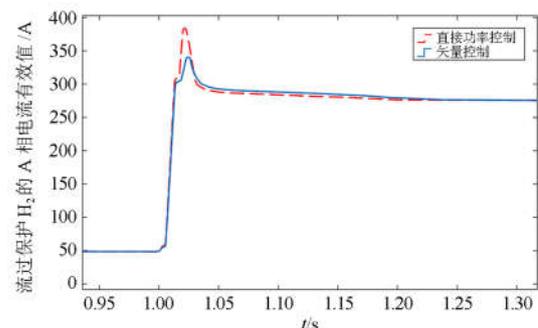
该配电网采取阶段式电流保护, 当双馈风机未接入电网时, 取 $K_{rel}^I=1.20$, $K_{rel}^{II}=1.15$, 得出各线路上的保护整定值如表 2。

表 2 电流保护的整定值

Table 2 Setting value of current protection

线路	线路首端保护	线路末端三相 短路电流	A	
			I 段整定值	II 段整定值
AB	H_1	475.11	570.13	363.67
BC	H_2	263.53	316.24	276.61
CD	H_3	200.44	240.53	—

若 DFIG 从 B 点接入配电网, CD 线路首端的 k_1 点 1 s 时发生三相经电阻接地短路, 设置不同的故障电阻值, 使故障点电压发生不同程度的下降, 对 DFIG 机侧变流器分别在矢量控制和直接功率控制下的短路电流特性进行仿真分析, 本文选取三相电流中的 A 相进行分析, 图 4 给出了流过保护 H_2 的 A 相电流有效值对比, 表 3 给出了数据对比。



(a) 电压跌落 100%

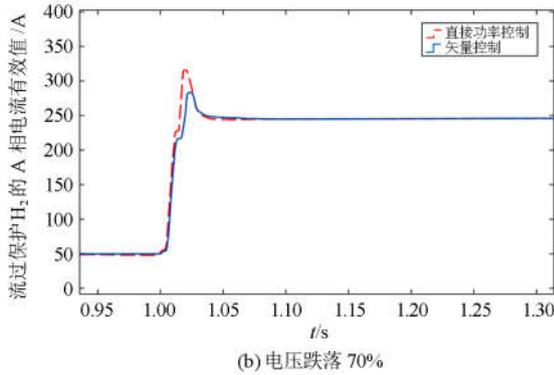


图 4 流过保护 H₂ 的 A 相电流有效值

Fig. 4 Effective value of A phase current flowing through protection H₂

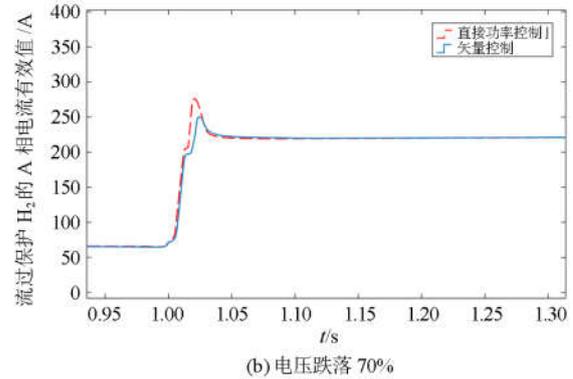


图 5 流过保护 H₂ 的 A 相电流有效值

Fig. 5 Effective value of A phase current flowing through protection H₂

表 3 流过保护 H₂ 的 A 相电流数据对比

Table 3 Comparison of A phase current data flowing through protection H₂

电压跌落 100%	超调量/%	调整时间/s	最大电流/A	I 段整定值/A
矢量控制	62	0.23	337	316
直接功率控制	108	0.18	383	316
电压跌落 70%	超调量/%	调整时间/s	最大电流/A	I 段整定值/A
矢量控制	37	0.09	284	316
直接功率控制	72	0.06	319	316

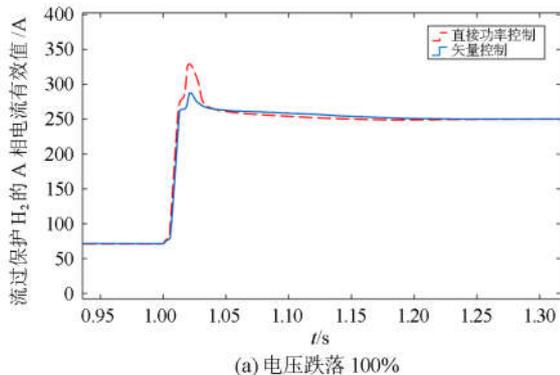
表 4 流过保护 H₂ 的 A 相电流的数据对比

Table 4 Data comparison of A phase currents flowing through protection H₂

电压跌落 100%	超调量/%	调整时间/s	最大电流/A	I 段整定值/A
矢量控制	15	0.24	288	316
直接功率控制	32	0.17	329	316
电压跌落 70%	超调量/%	调整时间/s	最大电流/A	I 段整定值/A
矢量控制	14	0.12	250	316 A
直接功率控制	24	0.08	277	316 A

若 DFIG 从 C 点接入配电网, AB 线路末端 k₂ 点 1 s 时发生三相经电阻接地短路, 设置不同的故障电阻值, 使故障点电压发生不同程度的下降, 对 DFIG 机侧变流器分别在矢量控制和直接功率控制下的短路电流特性进行仿真分析, 图 5 给出了流过保护 H₂ 的 A 相电流有效值对比, 表 4 给出了数据对比。

从表 3 可以看出: 当 DFIG 从 B 点接入配电网, CD 线路的首端 k₁ 点 1 s 发生故障, 电压下降 100% 时, 矢量控制与直接功率控制都引起 H₂ 的 I 段保护误动; 电压下降 70% 时, 采用直接功率控制会引起 H₂ 的 I 段保护误动, 采用矢量控制不会引起 H₂ 的 I 段保护误动。



(a) 电压跌落 100%

由表 4 可以看出, 当 DFIG 从 C 点接入配电网, AB 线路的末端 k₂ 点 1 s 时发生故障, 电压下降 100% 时, 采用直接功率控制会引起 H₂ 的 I 段保护误动, 采用矢量控制不会引起 H₂ 的 I 段保护误动。

并且由表 3 和表 4 中数据可知直接功率控制瞬时提供的短路电流值大, 超调量较大, 调整时间短, 矢量控制瞬时提供的短路电流小, 超调量小, 调整时间长, 并且电压下降越多, 这种差距越明显, 对保护的影响越严重。

4 改进措施及仿真分析

4.1 控制策略的改进

DFIG 机侧变流器采用矢量控制时, 为了有效地减少 DFIG 在故障期间对继电保护的影响, 本文提出在转子电流参考指令中加以补偿项的方法, 对 DFIG 的矢量控制的改进措施, 通过对转子电流的抑制, 使得故障发生短时间内短路电流值加速衰减。

由式(2)可知, 发生短路时, 定子侧电压瞬间跌落, 因此定子侧暂态电压为 0, 所以有式(13)。

$$\frac{d\psi_{s1}}{dt} = -r_s i_{s1} \quad (13)$$

5 结论

本文针对发生三相短路时不同控制策略下的DFIG的短路电流特性及对继电保护的影响开展了研究,并进行了仿真分析。理论分析及仿真结果表明,直接功率控制策略响应速度快,超调量大,可能造成电流速断保护的误动;矢量控制策略响应速度慢,超调量小。对双馈电机机侧变流器的矢量控制进行改进,通过增加控制补偿项可加速故障发生后DFIG提供的短路电流的衰减过程。从而减少故障时DFIG对继电保护及网络的不利影响,Matlab仿真分析验证了该方法的可行性。

参考文献

- [1] 李生虎,唐彩林,吴东,等.基于电压相位比较的双馈风电场输电线路单相接地距离保护[J].电力系统保护与控制,2018,46(23):1-7.
LI Shenghu, TANG Cailin, WU Dong, et al. Distance protection based on voltage phase comparison for line to ground fault of transmission line connecting wind farm with DFIGs[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 1-7.
- [2] 曹晓冬,杨世海,支亚薇,等.基于预测虚拟转矩控制的DFIG并网逆变方法[J].电力工程技术,2019,38(2):32-37,98.
CAO Xiaodong, YANG Shihai, ZHI Yawei, et al. The predictive virtual torque control method for distributed DFIG grid connected inverter system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2): 32-37, 98.
- [3] HERI S A M B Z, SJAMSJUL A, et al. Optimal controller for doubly fed induction generator (DFIG) using Differential Evolutionary Algorithm (DE)[C] // 2015 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), 2015, Surabaya: 159-164.
- [4] HOOSHYAR A, AZZOUZ M A, EI-SAADANY E F. Three-phase fault direction identification for distribution systems with DFIG-based wind DG[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3): 747-756.
- [5] 宋绍剑,徐覃萍,廖碧莲.风电接入对配电网电流保护的影响研究[J].计算机仿真,2015,32(1):137-142.
SONG Shaojian, XU Tanping, LIAO Bilian. Study on influence of wind power access to current protection of distribution network[J]. Computer Simulation, 2015, 32(1): 137-142.
- [6] 毕天姝,刘素梅,薛安成,等.具有低电压穿越能力的双馈风电机组故障暂态特性分析[J].电力系统保护与控制,2013,41(2):26-31.
BI Tianshu, LIU Sumei, XUE Ancheng, et al. Fault transient characteristics analysis of doubly-fed wind turbine generator with low voltage ride capacity[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 26-31.
- [7] 熊小伏,齐晓光,欧阳金鑫.双馈风电机组短路电流对变压器保护二次谐波制动的的影响[J].中国电机工程学报,2014,34(13):2201-2209.
XIONG Xiaofu, QI Xiaoguang, OUYANG Jinxin. Effect of doubly-fed wind turbines short-circuit current on second harmonic escapement of transformer protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2201-2209.
- [8] 张保会,郭丹阳,王进,等.风电接入对继电保护的影响(五)——风电分散式接入配电网对电流保护影响分析[J].电力自动化设备,2013,33(5):1-6.
ZHANG Baohui, GUO Danyang, WANG Jin, et al. Impact of wind farm integration on relay protection (5): impact of wind farms dispersedly connected to distribution network on current protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(5): 1-6.
- [9] 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.
- [10] 李晶,李鑫,马越,等.分布式电源容量对配电网保护的影响分析[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(2):98-102.
LI Jing, LI Xin, MA Yue, et al. Analyze on the capacity of distributed generation on distribution network protection[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2016, 28(2): 98-102.
- [11] 程金牛,童晓阳.风电DG布置、容量等多因素对配电网电流保护的影响[J].电气应用,2013,32(16):112-117.
CHENG Jinniu, TONG Xiaoyang. Influence of multiple factors such as wind power DG layout and capacity on current protection of distribution network[J]. Electrical Application, 2013, 32(16): 112-117.
- [12] 王燕萍,郑涛,王增平.不同控制策略对双馈风机暂态特性影响仿真研究[J].现代电力,2016,33(4):72-78.
WANG Yanping, ZHENG Tao, WANG Zengping. Simulation research of the impact of different control strategies on transient characteristics of DFIG[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(4): 72-78.
- [13] 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.
- [14] 段之英, 黄润长, 负保记. 风机接入配电网的自适应电流保护方案研究[J]. 电气自动化, 2019, 41(2): 33-35. DUAN Zhiying, HUANG Runchang, YUN Baoji. Research on adaptive current protection scheme for wind turbine integration to the distribution network[J]. Electrical Automation, 2019, 41(2): 33-35.
- [15] QU Haibo, JIA Qingquan, BO Zhiqian. MPSO based protective relay coordination for micro-grid[C] // 10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010), Managing the Change, March 29 - April 1, 2010, Manchester, UK.
- [16] 马静, 刘静. 基于故障稳态分量的含 DG 配电网自适应方向电流保护方案[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 1-9. MA Jing, LIU Jing. Adaptive directional current protection scheme based on steady state component in distribution network with DG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 1-9.
- [17] 谭刚雷, 郝润科, 朱军. 双馈变速恒频风力发电系统矢量控制模型的研究[J]. 电气自动化, 2010, 32(4): 66-70. TAN Ganglei, HAO Runke, ZHU Jun. Study on vector control model of variable-speed constant-frequency double-fed wind power generation system[J]. Electrical Automation, 2010, 32(4): 66-70.
- [18] YAN Shaoming, WANG Shan, ZHOU Yanfei, et al. Study on an optimum design for DC and doubly-controlled DFIG system[C] // 2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2019, Nanchang, China: 1594-1598.
- [19] ZHU Xinyu, PAN Zaiping. Study on the influencing factors and mechanism of SSR due to DFIG-based wind turbines to a series compensated transmission system[C] // 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2017, Edinburgh: 1029-1034.
- [20] BOUBZIZI S, ABID H, ELHAJJAJI A, et al. Comparative study of three types of controllers for DFIG in wind energy conversion system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 214-225. DOI: 10.1186/s41601-018-0096-y.
- [21] 肖繁, 张哲, 赖清华, 等. 双馈型电源短路电流统一解析方法及特性分析研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(14): 3319-3331. XIAO Fan, ZHANG Zhe, LAI Qinghua, et al. Study on unified analysis method and characteristics in fault currents of doubly-fed induction generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(14): 3319-3331.
- [22] 王增平, 李菁, 郑涛, 等. 考虑变流器限流与 GSC 电流的双馈风力发电机暂态全电流计算与分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(17): 4123-4135. WANG Zengping, LI Jing, ZHENG Tao, et al. Calculation and analysis of transient short circuit current of doubly-fed induction generator considering convertor current limitation and GSC current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(17): 4123-4135.
- [23] 康祎龙, 郑婷婷, 苗世洪, 等. 不平衡电网电压下双馈感应发电机系统串联和并联侧变换器协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(增刊 1): 193-204. KANG Yilong, ZHENG Tingting, MIAO Shihong, et al. Coordinated control strategy of series and parallel grid side converters for DFIG system under unbalanced grid voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S1): 193-204.
- [24] 贺惟明. 双馈发电机的功率控制及其电网故障情况下的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017. HE Weiming. The power control of doubly fed generators and its research on power grid faults[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.

收稿日期: 2019-03-08; 修回日期: 2019-06-21

作者简介:

于淼(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 779546480@qq.com

汤亚芳(1976—), 女, 通信作者, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护、电力电子在电力系统中的应用等; E-mail: 1560368@qq.com

黄亦欣(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为并网换流器的稳定。E-mail: 874049380@qq.com

(编辑 葛艳娜)