

基于BPA的双馈风电机组不对称故障穿越策略优化研究

陈众¹, 吴永康¹, 蒋洋¹, 吴辅朝²

(1. 智能电网运行与控制重点实验室(长沙理工大学), 湖南 长沙 410004;

2. 国网湖南超高压变电公司, 湖南 长沙 410004)

摘要:针对双馈风电机组不对称故障下控制策略的精确度低的问题,提出了一种基于BPA的双馈风电机组模型的不对称故障穿越下的优化控制策略,从而获取在不对称故障工况下更为精确的双馈风电机组故障控制模型参数。首先,对风电机组的机电暂态仿真模型结构进行分析,明确了机电暂态模型的拓扑结构;然后,明确风电机组的故障穿越控制原理以及风电机组的故障穿越控制策略,并通过公式计算推导以及数据验证对风电机组的控制策略进行优化,通过仿真结果的误差分析,从而对比优化后的策略控制是否具备更吻合的控制方式,进而验证优化后的控制策略的精确性。

关键词:双馈风电机组;不对称故障;机电暂态模型;低电压穿越

中图分类号:TM614 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26010

Optimization of Asymmetric Fault Ridethrough Strategy for Doubly Fed Wind Turbine Based on BPA

CHEN Zhong¹, WU Yongkang¹, JIANG Yang¹, WU Fuchao²

(1. Key Laboratory of Smart Grid Operation and Control (Changsha University of Science & Technology),

Changsha 410004, Hunan, China; 2. State Grid Hunan Ultra High Voltage Substation Company,

Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: An optimization control strategy based BPA for doubly fed wind turbines under asymmetric fault ridethrough was proposed to address the issue of low accuracy of control strategies under asymmetric faults, in order to obtain more accurate fault control model parameters for doubly fed wind turbines under asymmetric fault conditions. Firstly, the structure of the electromechanical transient simulation model for wind turbines was analyzed, and the topology of the electromechanical transient model was clarified. Then, the fault crossing control principle of wind turbines was clarified, as well as the fault crossing control strategy of wind turbines. The control strategy of wind turbines was optimized through formula calculation and data verification. Through error analysis of simulation results, it compared whether the optimized strategy control has a more consistent control method, and verified the accuracy of the optimized control strategy.

Key words: doubly fed wind turbine; asymmetric fault; electromechanical transient model; low voltage ride through(LVRT)

在双碳目标的引领下,以风电为代表的可再生能源在电力系统中占比逐渐增加,截至2023年底,我国风力发电装机达到约4.41亿kW,占我国发电装机总量15.1%,同比增长20.7%^[1]。由于目前风电场站多存在缺乏对系统的支撑能力、稳

定性差等问题,给以新能源为主体的新型电力系统带来安全稳定方面的一系列挑战^[2-6]。

双馈风电机组是风力发电系统的核心装置之一,明确双馈风电机组控制模型和参数是风电站建模分析及电力系统仿真分析的基础。此外,

基金项目:南方电网科研院科技项目(0002200000039389)

作者简介:陈众(1974—),男,博士,教授,主要研究方向为电力系统运行与控制,Email:24591003340@qq.com

通讯作者:吴永康(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为新能源并网,Email:1415707508@qq.com

考虑到电网实际运行中,不对称故障发生的概率远高于对称故障^[7-8],且不对称故障对风电机组发电系统的危害也更加严重。然而,现有低电压穿越控制策略大多针对对称故障进行分析与设计^[9-10]。因此,亟需针对不对称故障下的低电压穿越控制策略进行研究。

近年来,针对双馈风电机组在不对称故障下的控制模型已开展了大量研究^[11]。利用双馈风电机组在不对称故障下的控制策略建立双馈风机的故障控制模型^[12]。在双馈风机的建模方面,主要有为突出主要特征的简化建模方式以及考虑详细过程的建模方法。美国西部电力协调委员会(Western Electricity Coordinating Council, WECC)所提出的动态控制仿真模型^[13]、国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)提出的控制模型^[14]以及美国通用电气公司(General Electric, GE)提出的 PSLF 控制仿真模型^[15]均将双馈风电机组视为受控电流源,适用于双馈风电机组的机电暂态过程。文献[16]使用了BPA建立精确的机电暂态模型仿真。此外,文献[17]基于相量概念,提出了适用于双馈风电机组的相量控制策略模型,分析了考虑负序分量对双馈风机不对称故障控制策略的影响。文献[18-19]基于正负零序分解的思想使用正序补偿法分析不对称故障。

本文从双馈风电机组的通用控制模型入手,结合电网实测数据仿真,基于 PSD-BPA 机电暂态仿真程序中双馈风电机组模型的基本结构分析不对称故障下低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)的控制策略。针对风电机组不对称故障,本文叙述了在仅考虑基波正序部分的有功无功参数在低电压穿越过程中的控制策略。同时还提出了风电机组在不对称故障工况下考虑负序部分的有功无功控制策略。根据故障跌落测试得到的并网点的电压电流值,分别辨识两种情况下的低电压穿越不对称故障控制策略参数,利用辨识出的参数进行仿真校验,通过误差对比结果,验证了双馈风电机组在低电压穿越过程中不对称故障的优化控制策略模型更为准确。

1 故障穿越双馈风电机组模型

近几年由能源部电力科学研究院引进并推广应用的BPA程序是以1983年版为基础开发而成的,在程序中加入我国电力系统分析计算所

必需的重要功能,形成了适合我国电力系统分析计算的中国版BPA程序。PSD-BPA主要用于机电暂态仿真。

PSD-BPA程序中的通用型风电系统暂稳模型包含多个模块,总体框图如图1所示。主要模块有:1)双馈机组发电模型;2)风电机组稳态控制模块,包括正常有功控制模型、无功控制模型和有功/无功电流限制模型;3)风电机组故障电压穿越模块,包括高、低电压状态判断模型、故障穿越有功控制模型和故障穿越无功控制模型。

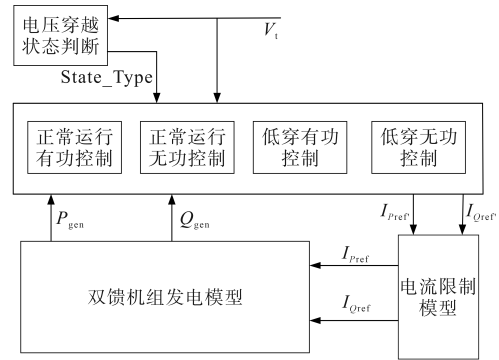


图1 风电系统暂稳模型

Fig.1 Temporary stability model of wind power system

1.1 电压穿越状态判断模块

判断是否进入电压穿越状态的模块部分,当双馈风力发电机组机端电压大于0.9(标么值)时,风力机按照正常的PQ控制模式运行,当双馈风力发电机组机端电压小于0.9(标么值)时,风力机进入低电压穿越控制模式。

1.2 正常运行有功控制

根据风机控制基本原理,应根据最佳叶尖速比进行控制,原则上需要检测当前的风速,根据风速计算出机组的最优转速,根据转速计算出机组的有功功率。实际上由于风速测量的不准确,一般采用直接检测转速的方法进行最大功率跟踪。因此有功功率的控制模型原则上如图2所示。

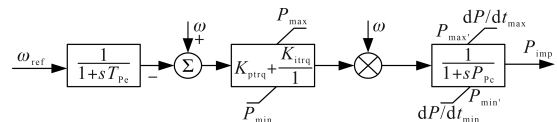


图2 有功功率控制模型

Fig.2 Active power control model

1.3 正常运行无功控制

无功功率的原理控制模型如图3所示。包含电压控制方式、功率控制方式和功率因数控制方式,其中电压控制方式还可以制定电压控制点的位置。

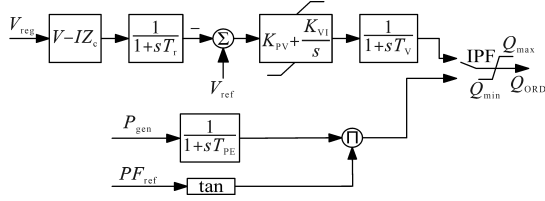


图3 无功功率控制模型

Fig.3 Reactive power control model

1.4 低穿有功控制

低电压穿越有功功率控制模式包括稳态控制、指定功率、指定电流3种控制方式。

1) 稳态控制。不进行电流指令的切换,依然为正常运行状态下有功、无功电流。但此时冻结控制环节中的积分环节。

2) 指定功率。指定低电压穿越期间有功功率 P_{ref} , 其除以机端电压 U_t 得到有功电流指令 IP_{ref} , 计算公式为

$$\begin{cases} P_{ref} = K_p P_0 + P_{SET} \\ IP_{ref} = P_{ref} / U_t \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_p 为低穿有功功率系数; P_{SET} 为低穿有功功率设定值; P_0 为初始有功功率。

3) 指定电流。指定低电压穿越期间有功电流指令 IP_{ref} , 计算公式为

$$IP_{ref} = K_{pv} U_t + K_{pi} IP_0 + IP_{SET} \quad (2)$$

式中: K_{pv} , K_{pi} 均为低穿有功电流计算系数; IP_{SET} 为低穿有功电流设定值; IP_0 为初始有功电流。

1.5 低穿无功控制

低电压穿越无功控制包括稳态控制、指定功率、指定电流3种控制模式。

1) 稳态控制。电流指令为正常运行状态下时冻结积分环节后的无功电流指令。

2) 指定功率。指定低电压穿越期间无功功率 Q_{ref} , 除以机端电压 U_t 得到无功电流指令 IQ_{ref} , 即

$$\begin{cases} Q_{ref} = K_Q Q_0 + Q_{SET} \\ IQ_{ref} = Q_{ref} / U_t \end{cases} \quad (3)$$

式中: K_Q 为低穿无功功率系数; Q_{SET} 为低穿无功功率设定值; Q_0 为初始无功功率。

3) 指定电流。引入低电压穿越阈值 U_{SET} , 此时电流指令为

$$IQ_{ref} = K_{QV} (U_{SET} - U_t) + K_{QI} IQ_0 + IQ_{SET} \quad (4)$$

式中: K_{QV} , K_{QI} 均为低穿无功电流计算系数; IQ_{SET} 为低穿无功电流设定值; IQ_0 为初始无功电流。

1.6 电流限制模型

在故障电压穿越过程和稳态控制阶段, 光伏逆变器限制有功和无功电流输出最大值。变流

器有功电流和无功电流的限幅分为有功电流优先、无功电流优先情况, 控制模型如图4所示。

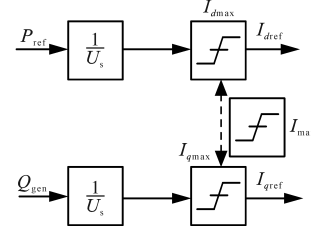


图4 电流限制模型

Fig.4 Current limiting model

2 基于BPA的不对称故障计算模型

对于LVRT的并网测试试验, 采用“全系统法”模拟风电机组低电压穿越和高电压穿越试验。对低压侧的三相电压电流值进行采样录波。“全系统法”电压跌落装置如图5所示。

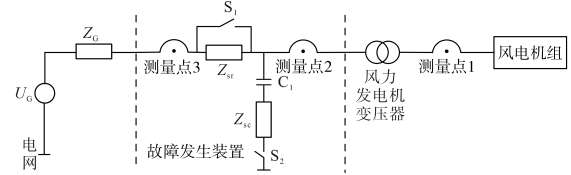


图5 “全系统法”电压跌落装置

Fig.5 "Whole system method" voltage drop device

图5中, U_G 为电网电压, Z_G 为电网短路阻抗, Z_{sf} 为故障发生装置限流阻抗, Z_{sc} 为故障发生装置短路阻抗。

2.1 双馈风电机组在不对称故障情况

在双馈风电机组遇到不对称故障时, 有功、无功以及正负序参数会受到影响。不对称故障可能会导致部分功率损失或转矩不平衡, 从而影响发电机的有功功率输出。风电机组通常需要控制无功功率以维持电网电压稳定。在发生不对称故障时可能引起电网侧的电压波动, 从而影响有功功率的送入电网侧。

为了准确建立双馈风电机组的故障机电暂态模型, 我们首次考虑了故障期间的负序分量参数, 优化了不对称故障穿越的控制策略, 建立更为准确的机电暂态模型。

2.2 正序部分的不对称故障控制

根据故障发生装置模拟的低电压穿越及高电压穿越试验采样的三相电压电流瞬时值, 通过傅里叶变换以及正负零序分解得到风电机组的有功无功功率, 数据处理过程如下:

利用傅里叶分解计算一个基波周期内基波分量的傅里叶系数:

$$u_{a,\sin} = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t u_a(t) \sin(2\pi f_1 t) dt \quad (5)$$

$$u_{a,\cos} = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t u_a(t) \cos(2\pi f_1 t) dt \quad (6)$$

式中: $u_{a,\sin}, u_{a,\cos}$ 为 a 相电压的实轴、虚轴分量; f_1 为基波频率。

利用正序零序分解得出正、负序的电压:

$$\begin{aligned} u^P &= \frac{1}{3} u_a + \frac{a}{3} u_b + \frac{a^2}{3} u_c \\ &= \frac{1}{6} [2u_{a,\cos} - u_{b,\cos} - u_{c,\cos} + \sqrt{3}(u_{c,\sin} - u_{b,\sin})] + \\ &\quad j \frac{1}{6} [2u_{a,\sin} - u_{b,\sin} - u_{c,\sin} + \sqrt{3}(u_{b,\cos} - u_{c,\cos})] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} u^N &= \frac{1}{3} u_a + \frac{a^2}{3} u_b + \frac{a}{3} u_c \\ &= \frac{1}{6} [2u_{a,\cos} - u_{b,\cos} - u_{c,\cos} - \sqrt{3}(u_{c,\sin} - u_{b,\sin})] + \\ &\quad j \frac{1}{6} [2u_{a,\sin} - u_{b,\sin} - u_{c,\sin} - \sqrt{3}(u_{b,\cos} - u_{c,\cos})] \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$a = e^{j\frac{2}{3}\pi}$$

通过 Park 变换可求取有功功率的计算式:

$$\begin{aligned} P &= U_{abc}^T I_{abc} = [P^{-1}(\theta) U_{dq0}]^T [P^{-1}(\theta) I_{dq0}] \\ &= \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) + 3u_0 i_0 \end{aligned} \quad (9)$$

同理可求出无功功率的计算式为

$$Q = \frac{3}{2} (u_q i_d - u_d i_q) \quad (10)$$

2.3 考虑负序部分的不对称优化控制

由于不对称故障模型仅以正序电压以及正序电压的功率为输出,导致在忽略负序部分的有功功率和无功功率的情况下,控制策略无法满足双馈风电机组的内部实际控制情况,在考虑负序部分的状况下,有功无功控制策略的有功无功出力与实际控制的状况相吻合。

$$\begin{cases} P^N = \frac{3}{2} (u_{2d} i_{2d} + u_{2q} i_{2q}) \\ Q^N = \frac{3}{2} (u_{2q} i_{2d} - u_{2d} i_{2q}) \end{cases} \quad (11)$$

考虑负序部分功率,在不对称故障下的故障总有功率和无功功率为

$$\begin{cases} P_{\text{ref}} = P + P^N \\ Q_{\text{ref}} = Q + Q^N \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{\text{ref}}, Q_{\text{ref}}$ 分别为有功功率和无功功率的参考值。

考虑负序部分的相关参数,分析在不对称故

障下的故障总有功电流和无功电流的计算过程。根据瞬时功率理论,有功功率和无功功率的计算如下:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_d & u_q \\ u_q & -u_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (13)$$

由式(13)可得:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} u_d & u_q \\ u_q & -u_d \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{\text{ref}} \\ Q_{\text{ref}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d^P + i_d^N \\ i_q^P + i_q^N \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中, i_d^P, i_q^P 和 i_d^N, i_q^N 为正负序有功和无功电流,所以式(13)可重新表述如下:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} i_d^P \\ i_q^P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_d^N \\ i_q^N \end{bmatrix} \\ &= \frac{2}{3} \frac{P_{\text{ref}}}{u_d^2 + u_q^2} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \frac{2}{3} \frac{Q_{\text{ref}}}{u_d^2 + u_q^2} \begin{bmatrix} -u_q \\ u_d \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

利用考虑负序功率部分的优化控制策略与实际控制辨识相关的有功无功的机电暂态控制参数,而后利用考虑负序部分的有功无功参数进行仿真。

3 验证分析

对 2.0 MW 的双馈风电机组开展了低电压穿越、高电压穿越的测试工作,根据该风电场半实物实时仿真的并网测试故障实测数据,通过该批数据验证不对称故障穿越时的优化控制策略。

3.1 故障分区及误差计算

以测试数据为依据,对故障过程进行分区,图6所示为低电压穿越过程分区示意图。

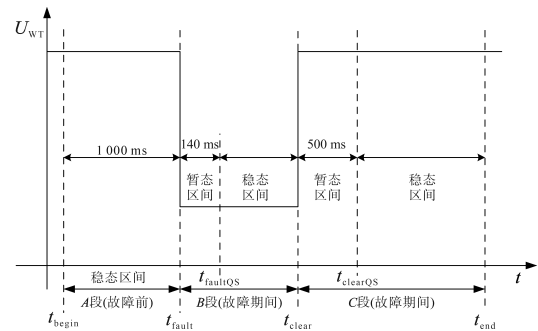


图6 低电压穿越过程分区示意图

Fig.6 Schematic diagram of LVRT process zoning

图6中, U_{WT} 为风电机组机端电压测试值, t_{begin} 为故障穿越过程进行模型验证的开始时刻, t_{fault} 为故障开始时刻, t_{faultQS} 为故障后的稳态开始时刻, t_{clear} 为故障清除时刻, t_{clearQS} 为故障清除后的稳态开始时刻, t_{end} 为故障穿越过程结束时刻。

根据故障分区可对数据进行误差计算,仿真误差为计算模型仿真数据与试验数据之间的偏

差,分别获取稳态区间和暂态区间的平均偏差、稳态区间最大偏差、稳态区间和暂态区间的平均绝对偏差、各时段加权平均绝对偏差,其中A段、B段、C段分别表示故障前、故障期间和故障后3个阶段,数据均为标么值。

3.2 故障原始数据

根据原始数据可绘制电压电流波形图,由于存在多工况的数据,此处选取大功率20%跌落电压工况。同时,数据录波时间较长,所以截取故障前部分数据和故障期间部分数据来绘图,电压、电流波形图如图7、图8所示。

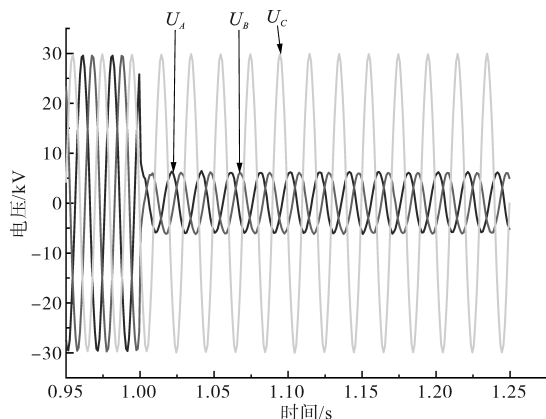


图7 并网点三相测试电压

Fig.7 Junction point three-phase test voltage

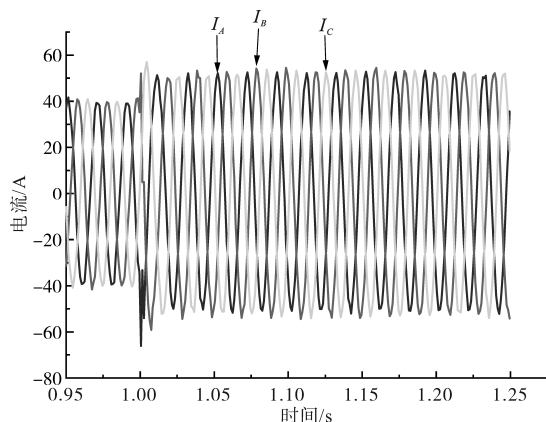


图8 并网点三相测试电流

Fig.8 Junction point three-phase test current

3.3 不对称故障穿越策略分析

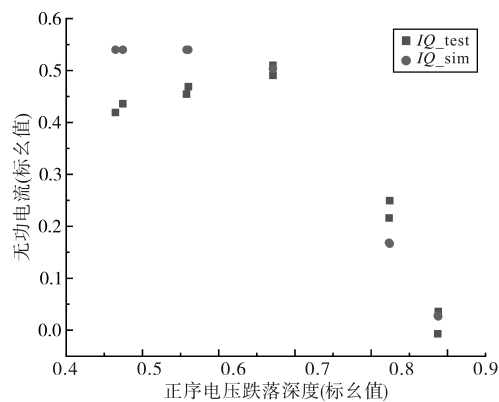
依照原始测试数据处理计算的不对称故障工况的有功无功参数与基波正序跌落电压深度的曲线如图9所示。其中, IQ_{test} 和 P_{test} 为无功电流实测数据故障期间的参数点,而 IQ_{sim} 和 P_{sim} 为有功功率仿真数据故障期间的参数点。可通过最小二乘法辨识出有功控制策略为指定功率控制,无功控制策略为指定电流控制,辨识出以下的有功、无功控制策略参数:

1)有功控制参数为

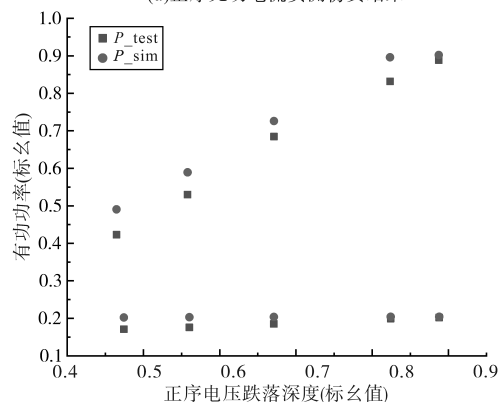
$$\begin{cases} K_P = 1.0 \\ P_{SET} = 0 \\ \text{s.t. } IP_{max} \leq 1.101 \\ \text{s.t. } I_{max} \leq 1.186 \end{cases} \quad (16)$$

2)无功控制参数为

$$\begin{cases} K_{QV} = 2.20 \\ U_{SET} = 0.9 \\ K_{QI} = 0 \\ IQ_{SET} = 0 \\ \text{s.t. } IQ_{max} \leq 0.540 \\ \text{s.t. } I_{max} \leq 1.186 \end{cases} \quad (17)$$



(a)正序无功电流实测仿真结果



(b)正序有功功率实测仿真结果

图9 正序有功、无功实测仿真结果

Fig.9 Positive-sequence active and reactive power measurement simulation results

根据辨识出的故障策略参数对该双馈风电机组进行仿真校验,由于在电压跌落较深处的工况的不平衡度较大,其负序部分的有功无功参数也较大,导致在电压跌落较深的工况处仿真与实测误差较大,所以此处仅绘制电压跌落较深的两个工况的仿真结果,其相关仿真结果如图10、图11所示,该工况依照NB/T 31053—2021《风电机组电气仿真模型验证规程》^[20]标准计算得到的误差如表1、表2所示。

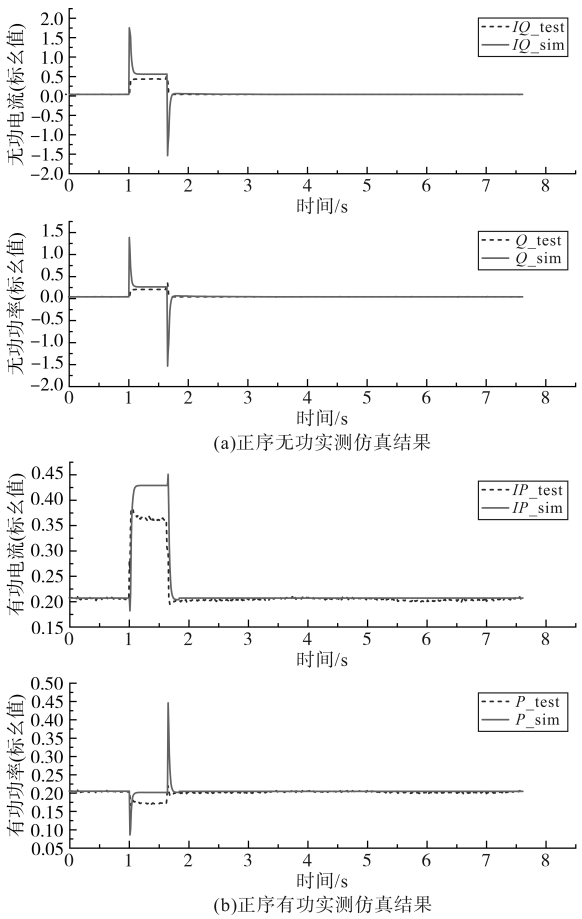


图10 正序仿真实测结果对比(小功率20%跌落)

Fig.10 Positive sequence simulation test results comparison
(20% drop in low-power)

表1 仿真误差表(小功率20%跌落)				
Tab.1 Simulation error table (20% drop in low-power)				
分段	参数	A段	B段	C段
平均偏差	IP	0.012	0.066	0.003
	IQ	0.000	0.104	0.002
	P	0.003	0.031	0.001
	Q	0.000	0.037	0.000
平均绝对偏差	U	0.003	0.012	0.003
	IP	0.001	0.068	0.004
	IQ	0.001	0.124	0.002
	P	0.001	0.029	0.004
加权平均绝对偏差	Q	0.001	0.058	0.002
	IP		0.042	
	IQ		0.075	
	P		0.019	
最大偏差	Q		0.036	
	IP	0.005	0.128	0.008
	IQ	0.003	0.134	0.013
	P	0.004	0.032	0.007
	Q	0.031	0.089	0.013

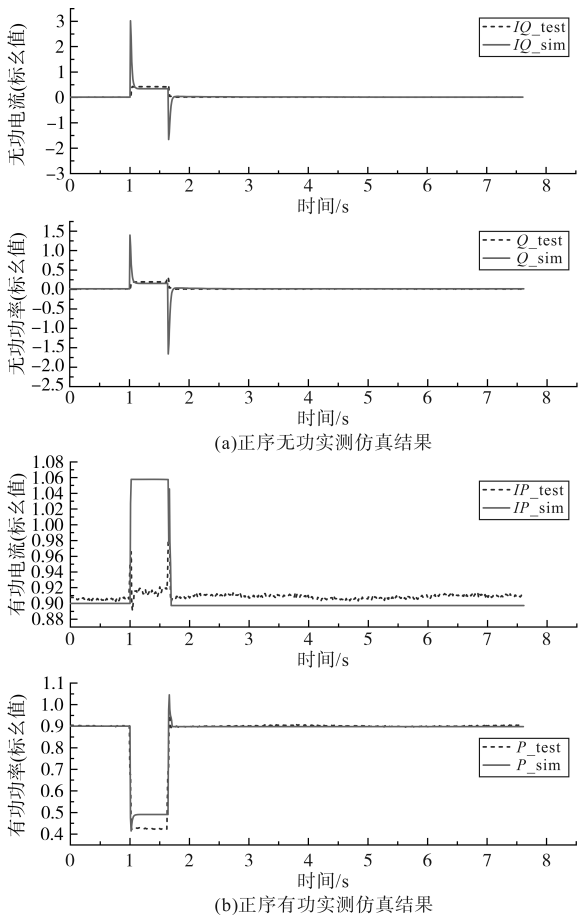


图11 正序仿真实测结果对比(大功率20%跌落)

Fig.11 Positive sequence simulation test results comparison
(20% drop in high-power)

表2 仿真误差表(大功率20%跌落)				
Tab.2 Simulation error table (20% drop in high-power)				
分段	参数	A段	B段	C段
平均偏差	IP	0.006	0.140	0.011
	IQ	0.001	0.047	0.003
	P	0.002	0.051	0.003
	Q	0.001	0.018	0.003
平均绝对偏差	U	0.005	0.010	0.008
	IP	0.006	0.141	0.011
	IQ	0.002	0.082	0.011
	P	0.002	0.069	0.004
加权平均绝对偏差	Q	0.002	0.042	0.011
	IP		0.089	
	IQ		0.053	
	P		0.043	
最大偏差	Q		0.029	
	IP	0.024	0.150	0.045
	IQ	0.007	0.143	0.017
	P	0.004	0.214	0.010
	Q	0.006	0.159	0.017

3.4 不对称故障穿越优化策略分析

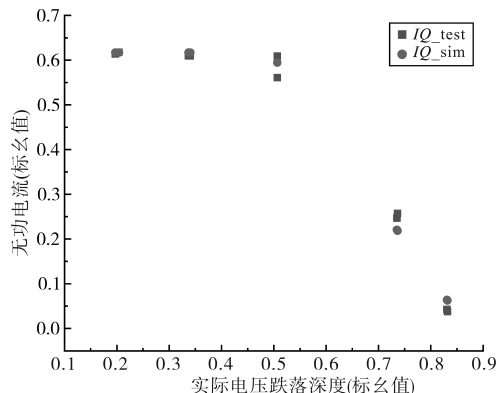
依照原始测试数据处理计算,不对称故障工况下的实际总有功无功参数与实际的跌落电压深度的曲线如图12所示。其中, IQ_{test} 和 P_{test} 为实测数据故障期间的参数点,而 IQ_{sim} 和 P_{sim} 为仿真数据故障期间的参数点。可通过最小二乘法辨识出有功控制策略为指定功率控制,无功控制策略为指定电流控制,辨识出以下的有功无功策略参数:

1)有功控制参数如下:

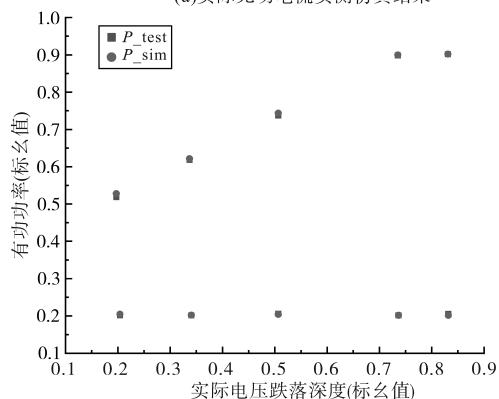
$$\begin{cases} K_p = 1.0 \\ P_{SET} = 0 \\ \text{s.t. } IP_{max} \leq 1.101 \\ \text{s.t. } I_{max} \leq 1.285 \end{cases} \quad (18)$$

2)无功控制参数如下:

$$\begin{cases} K_{QV} = 2.20 \\ U_{SET} = 0.8701 \\ K_{QI} = 0 \\ IQ_{SET} = 0 \\ \text{s.t. } IQ_{max} \leq 0.5943 \\ \text{s.t. } I_{max} \leq 1.285 \end{cases} \quad (19)$$



(a)实际无功电流实测仿真结果



(b)实际有功功率实测仿真结果

图12 实际有功无功实测仿真结果

Fig.12 Actual active and reactive power measurement and simulation results

根据辨识出的故障策略参数对该双馈风电机组进行仿真校验,考虑负序部分的有功无功仿真结果如图13、图14所示,该工况依照NB/T 31053—2021《风电机组电气仿真模型验证规程》标准所计算得到的误差表,其实际仿真实测误差如表3、表4所示。

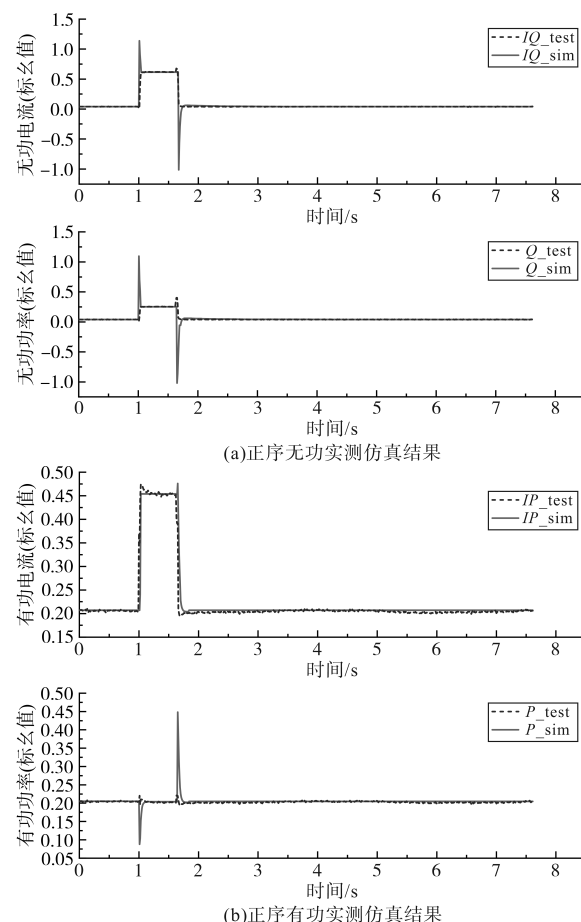


图13 实际仿真实测对比(小功率20%跌落)

Fig.13 Comparison of actual simulation and testing (20% drop in low-power)

根据实时仿真数据误差对比,在小功率电压跌落20%的工况下,未优化的控制策略下的实测仿真误差如表1所示,故障期间B段误差 IQ 的平均偏差和平均绝对偏差超出NB/T 31053—2021《风电机组电气仿真模型验证规程》标准所允许的范围,而优化后的控制策略下的实测仿真误差如表3所示,根据误差表中误差对比可知,在故障期间B段优化后的控制策略精确度更高。根据表2和表4的对比,在大功率电压跌落20%的工况下,优化后的控制策略误差较小,在标准范围之内,所以在故障期间B段优化后的控制策略精确度也更高。

表3 仿真误差表(小功率20%跌落)

Tab.3 Simulation error table (20% drop in low-power)

分段	参数	A段	B段	C段
平均偏差	IP	0.001	0.005	0.004
	IQ	0.000	0.027	0.001
	P	0.000	0.005	0.003
	Q	0.002	0.025	0.002
平均绝对偏差	U	0.003	0.004	0.003
	IP	0.001	0.004	0.004
	IQ	0.001	0.004	0.007
	P	0.001	0.003	0.003
	Q	0.001	0.008	0.007
加权平均绝对偏差	IP		0.004	
	IQ		0.005	
	P		0.003	
	Q		0.007	
最大偏差	IP	0.005	0.017	0.008
	IQ	0.003	0.006	0.013
	P	0.001	0.017	0.007
	Q	0.003	0.049	0.013

表4 仿真误差表(大功率20%跌落)

Tab.4 Simulation error table (20% drop in high-power)

分段	参数	A段	B段	C段
平均偏差	IP	0.004	0.010	0.004
	IQ	0.001	0.007	0.002
	P	0.002	0.002	0.001
	Q	0.001	0.024	0.001
平均绝对偏差	U	0.008	0.001	0.006
	IP	0.004	0.007	0.004
	IQ	0.002	0.036	0.007
	P	0.002	0.025	0.002
	Q	0.002	0.031	0.007
加权平均绝对偏差	IP		0.006	
	IQ		0.024	
	P		0.016	
	Q		0.021	
最大偏差	IP	0.014	0.103	0.008
	IQ	0.007	0.087	0.017
	P	0.004	0.121	0.007
	Q	0.006	0.088	0.017

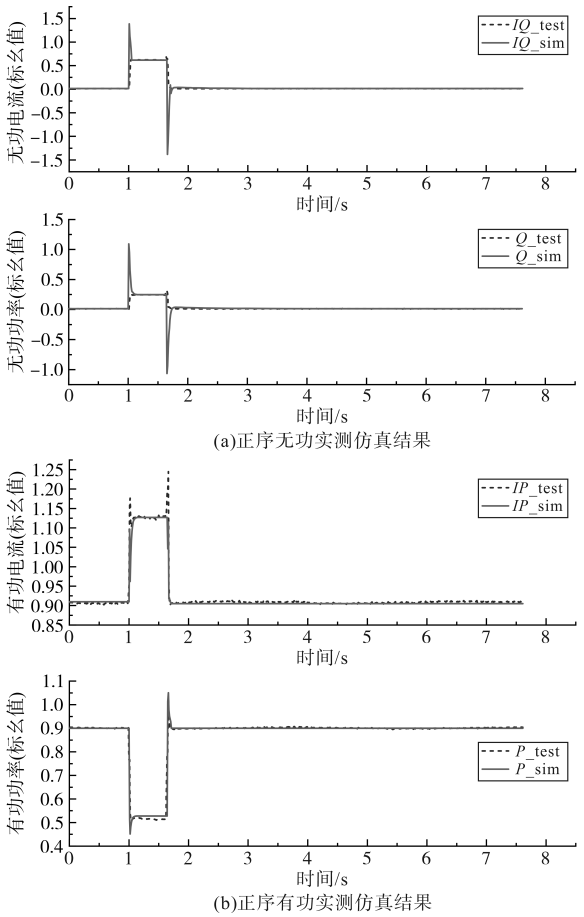


图14 实际仿真实测对比(大功率20%跌落)

Fig.14 Comparison of actual simulation and testing
(20% drop in high-power)

4 结论

本文分析了双馈风电机组在不对称故障穿越的机电暂态模型,提出了双馈风电机组在不对称故障穿越时的优化控制策略。通过仅考虑正序部分的不对称故障策略与优化后的不对称控制策略作对比,并采用仿真数据与实测数据对本文所提优化控制策略进行验证,得到以下结论:

在双馈风电机组在不对称故障穿越时仅考虑正序部分有功无功功率具有相对较大的误差,为不准确的结果,所得到的控制策略并不准确,导致双馈风电机组所建立的故障穿越模型精度较差。而对于考虑正负序部分叠加的有功无功功率下,在辨识出双馈风电机组的策略参数后,而后利用BPA仿真数据与实际数据对比,发现其误差远小于仅考虑基波正序部分的故障控制策略,误差减小,对应故障控制策略更为精确。

参考文献

[1] 国家能源局. 国家能源局发布2023年全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2024-01-26)[2024-06-20]. https://www.nea.gov.cn/2024-01/26/c_1310762246.htm.
National Energy Administration. National Energy Administration releases 2023 national power industry statistical data[EB/OL]. (2024-01-26)[2024-06-20]. https://www.nea.gov.cn/2024-01/26/c_1310762246.htm.

- [2] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8):2806-2818.
- [3] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7):1893-1904.
- [4] 康重庆,杜尔顺,李姚旺,等. 新型电力系统的“碳视角”:科学问题与研究框架[J]. 电网技术,2022,46(3):821-833.
KANG Chongqing, DU Ershun, LI Yaowang, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(3):821-833.
- [5] 陈国平,董昱,梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报,2020,40(17):5493-5505.
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17):5493-5505.
- [6] 任大伟,肖晋宇,侯金鸣,等. 双碳目标下我国新型电力系统的构建与演变研究[J]. 电网技术,2022,46(10):3831-3839.
REN Dawei, XIAO Jinyun, HOU Jinming, et al. Construction and evolution of China's new power system under dual carbon goal[J]. Power System Technology, 2022, 46(10):3831-3839.
- [7] GB/T 19963.1—2021,风电场接入电力系统技术规定 第1部分:陆上风电[S]. 北京:中国标准出版社,2021.
GB/T 19963.1—2021, Technical specification for connecting wind farm to power system part 1: on shore wind power[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [8] ZHANG Yajing, WANG Jing, LI Hong, et al. Dynamic performance improving sliding-mode control-based feedback linearization for PV system under LVRT condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11):11745-11757.
- [9] 陈晓龙,郑杰颖,李仲青,等. 光储联合发电系统不对称故障穿越控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报,2024,36(5):130-140.
CHEN Xiaolong, ZHENG Jieying, LI Zhongqing, et al. An asymmetric fault crossing control strategy for photovoltaic energy storage combined power generation system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(5):130-140.
- [10] 张君健. 弱电网对称故障下双馈风电机组稳定性分析研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
ZHANG Junjian. Research on the stability analysis of DFIG under weak grid with symmetrical fault[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [11] CHANG Y, KOCAR I, HU J, et al. Coordinated control of DFIG converters to comply with reactive current requirements in emerging grid codes[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(2):502-514.
- [12] 陈亚爱,刘劲东,周京华,等. 风力发电系统的低电压穿越技术综述[J]. 电气传动,2013,43(11):3-10,16.
CHEN Yaai, LIU Jindong, ZHOU Jinghua, et al. Review of low voltage ride through technologies in wind turbine generation system[J]. Electric Drive, 2013, 43(11):3-10, 16.
- [13] 马春明,解大,张延迟. 双馈感应式风力发电系统低电压穿越技术概述[J]. 电气传动,2012,42(5):3-7,32.
MA Chunming, JIE Da, ZHANG Yanchi. Overview of low voltage ride through for doubly-fed induction generator wind power system[J]. Electric Drive, 2012, 42(5):3-7, 32.
- [14] GÖKSU Ö, SØRENSEN P, FORTMANN J, et al. Compatibility of IEC 61400-27-1 Ed 1 and WECC 2nd generation wind turbine models[C]//Proceedings of the 15th Wind Integration workshop, 2016.
- [15] SRENSSEN P, FORTMANN J, BUENDIA F J, et al. Final draft international standard IEC 61400-27-1: Electrical simulation models of wind turbines[C]//13th International Workshop on Large-scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants, 2014.
- [16] CLARK K, MILLER N W, SANCHEZ-GASCA J J. Modeling of GE wind turbine-generators for grid studies[M]. America: GE Energy, 2010.
- [17] 刘宇,丛雨,郝晓玮,等. 基于PSD-BPA的双馈风电机组分段故障穿越特性及控制模式分析[J]. 内蒙古电力技术, 2023, 41(3):8-15.
LIU Yu, CONG Yu, HAO Xiaowei, et al. Analysis of segmented fault ride-through characteristics and control mode analysis of doubly-fed wind turbine segment based on PSD-BPA[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2023, 41(3):8-15.
- [18] KAUFFMANN T, KARAAGAC U, KOCARI I, et al. An accurate type III wind turbine generator short circuit model for protection applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(6):2370-2379.
- [19] 王晓兰,鲜龙,包广清,等. 不对称电网故障下的正序电压分量补偿法[J]. 电气传动,2015,45(2):63-69.
WANG Xiaolan, XIAN Long, BAO Guangqing, et al. Compensation method based on positive sequence voltage component under asymmetrical grid fault[J]. Electric Drive, 2015, 45(2):63-69.
- [20] NB/T 31053—2021,风电机组电气仿真模型验证规程[S]. 北京:中国电力出版社,2021.
NB/T 31053—2021, Code of practice for electrical simulation model validation of wind turbines[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2021.

收稿日期:2024-06-20

修改稿日期:2024-08-23