

新能源场站高比例接入下主流类型工频量距离保护比对

王丹枫¹, 刘素梅¹, 郑燃², 李伟³, 于子轩¹

(1.北京林业大学 工学院, 北京 100083; 2.国网浙江省电力有限公司金华供电公司, 浙江 金华 321000; 3.电网安全与节能国家重点实验室(中国电力科学研究院), 北京 100192)

摘要: 新能源场站高比例接入电网后,已有广泛应用的工频量距离保护判据存在无法准确识别电网故障的问题。文章着重从装置中保护判据与工频量提取算法入手,对比分析新能源场站高比例接入场景下不同类型距离保护算法的适应性。针对保护判据,对比分析了方向圆、多边形、比相式以及工频变化量距离保护各自的适应性,明确了能够较好适用于新能源场站高比例接入的距离保护判据。针对工频量提取算法,探究了不同类型新能源场站所提供短路电流中非周期谐波量的变化特性,进一步推导了受谐波量影响的傅里叶算法对工频量提取产生的计算误差,确定了影响工频量提取精度的关键谐波分量。

关键词: 新能源场站; 距离保护判据; 工频量提取; 短路电流; 谐波分量

中图分类号: TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)05-0655-09

0 引言

距离保护的保护区与灵敏度受系统运行方式变化的影响较小,因此,在110 kV以上线路中获得了广泛应用^[1-2]。然而,若被保护线路上所发生故障存在过渡电阻,测量阻抗将会受到线路两侧所接电源短路电流变化特性影响。针对该问题,现有距离保护判据仅计及了传统同步发电机短路电流变化特性对测量阻抗的影响,而并未考虑新能源场站短路电流变化特征^[3-5]。

目前已有大量文献从新能源场站接入对测量阻抗影响的角度,明确了工频量距离保护存在不正确动作的问题^[6-11]。但是,国内不同微机保护装置中距离保护算法有所不同,新能源场站接入场景下这些算法各自适应性仍未进行系统分析与评估。实际上,保护装置中工频量距离保护算法主要包括保护判据与工频量提取算法两大部分。针对不同距离保护判据的适应性问题,文献[12]通过搭建双馈和永磁直驱风电机组的电磁暂态模型,仿真分析了不同故障场景下方向圆距离保护应用于含风电场配电线路中的适应性,得出了受风电场故障电流特征影响,保护可能发生不正确动作的结论。文献[13]推导了典型低电压穿越控

制策略下光伏电站和永磁直驱风电场的短路电流表达式,从理论上揭示了短路电流幅值和相角特性对线路方向圆距离保护动作性能的影响。文献[14]考虑了风电系统的弱馈性和等值阻抗不稳定性,得出了风电系统接入会导致工频变化量距离保护不正确动作的结论。上述研究仅分析了新能源接入场景下某一种保护判据的动作特性,但并未从实际保护装置角度出发,系统对比评价不同保护判据的适应性。目前现场中应用的不同类型保护装置采用傅里叶算法提取工频量,该算法具有很强的滤除整数次谐波、抑制非整数次谐波的能力,但新能源场站的短路电流中含有较大的衰减直流和衰减转差频率分量,它们均会对工频量提取产生较大误差^[15,16]。实际上,这些分量的衰减系数、频率以及在工频周期量中占比均会对工频量提取误差有较大影响。为此,文献[17]从理论上推导了双馈风电机组短路电流中转差频率分量对傅里叶算法工频量提取产生的误差,但未对误差值进行定量分析,也未考虑衰减直流分量的影响。

针对上述问题,本文首先系统对比分析了不同类型距离保护判据的适应性,包括方向圆、多边形、比相式以及工频变化量距离保护,进一步确定

收稿日期: 2023-09-27。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52107069);中央高校基本科研业务费专项资金项目研究项目(2018BLRD02)。

通信作者: 刘素梅(1981-),女,博士,副教授,研究方向为新能源电力系统保护与控制。E-mail: smliu@bjfu.edu.cn

出能够较好适应新能源接入场景的保护判据。针对广泛应用于保护装置的傅里叶算法,首先探究了不同类型新能源场站所提供短路电流中非周期谐波量的变化特性,然后分别从定性与定量角度分析了谐波量给工频量提取带来的计算误差。

1 不同距离保护判据适应性对比

1.1 新能源场站工频短路电流特性

目前广泛应用的新能源电源主要分为全功率变换型与部分功率变换型电源两大类。全功率变换型电源也称为逆变型电源,通常包括光伏电站和永磁直驱风电场;而部分功率变换型电源通常为双馈风电场。因不同类型新能源电源的拓扑结构有所不同,所以其短路电流变化特性也不同。以下将分析两种类型新能源电源所提供短路电流的变化规律,从而总结出新能源电源基频短路电流的共性特征。

(1) 逆变型新能源电源

电网故障发生后,逆变型电源的短路电流变化特性与逆变器控制保护策略密切相关。逆变器通常采用相电流限幅和抑制负序电流的故障穿越策略^[18-21],即当电网发生故障时,逆变型新能源发电单元仅提供正序电流,其对应的电流矢量表达式为

$$i = \frac{2P_0}{3\gamma U_{gN}} - j \frac{2Q_0}{3\gamma U_{gN}} \quad (1)$$

式中: P_0 为逆变器输出的有功功率,其大小主要由光照度、电流限幅环节作用与否等决定; Q_0 为电网故障穿越要求的无功功率, $Q_0=1.5\gamma(0.9-\gamma)$; γ 为并网点正序电压跌落系数, $\gamma=U_{gp}/U_{gN}$, U_{gp} 为逆变型新能源发电单元并网点正序相电压幅值; U_{gN} 为并网点额定相电压幅值。

忽略逆变器上功率损耗,逆变器输出的有功功率 P_0 为

$$P_0 = \begin{cases} P_{dc} & \alpha_1=0 \\ \sqrt{(I_{lim}S_N/I_N)^2 - Q_0^2} & \alpha_1=1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{dc} 为逆变型新能源发电单元的直流功率; S_N 为发电单元的额定容量; I_N 为额定相电流; I_{lim} 为逆变器最大允许电流; α_1 为电流限制系数, $\alpha_1=0$ 表示电流限幅环节未作用, $\alpha_1=1$ 表示发生作用。

由式(1),(2)可知,逆变电源所提供基频短路电流的幅值受限于逆变器最大允许电流,且其大

小与并网点电压跌落系数成反比例规律变化。另外,故障期间逆变电源能够输出与并网点电压跌落系数相关的容性基频电流,即基频短路电流的相角受机端电压跌落系数(与电网故障程度有关,电网故障越严重,机端电压跌落系数越小;反之亦然)影响,其变化为 $-90\sim 90^\circ$ 。

(2) 双馈风电机组

当电网发生故障时,双馈风电机组机端电压发生跌落,电压跌落程度较重时,双馈风电机组的转子绕组中将产生冲击电流,为防止变流器过流受损,通常在转子侧投入Crowbar保护电路短接转子绕组^[22]。Crowbar电路短时投入(通常为30~50ms)后,转子侧变换器重启,在转子侧变换器暂态控制作用下双馈风电机组提供的基频短路电流矢量式为

$$i_s = \frac{\gamma e^{j\varphi} - j\omega_1 L_m i_r}{jL_s \omega_1} \quad (3)$$

式中: ω_1 为电网角频率。

在发电机定子参考坐标系下,转子电流的矢量表达式为

$$i_r = \begin{cases} -\frac{L_s P_s}{L_m} + j \left(\frac{Q_s L_s}{\gamma L_m} + \frac{\gamma}{L_m} \right) & \alpha_2=0 \\ \left[-\sqrt{I_{lim2}^2 - [(L_s Q_s / \gamma) + \gamma]^2} + j \left(\frac{Q_s L_s}{\gamma L_m} + \frac{\gamma}{L_m} \right) \right] e^{j\varphi_i} & \alpha_2=1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: L_m 为发电机定转子绕组间的等效互感; L_s 为发电机定子绕组的等效电感; γ 为机端电压跌落系数; $Q_s=1.5\gamma(0.9-\gamma)$ 为双馈风电机组故障期间向电网提供的无功功率; P_s 为故障期间发电机向电网提供的有功功率,主要与风速大小有关; I_{lim2} 为转子侧变流器最大允许电流值,通常取1.2~1.5倍额定转子电流; $\alpha_2=0$ 表示转子侧变流器电流限幅环节未作用, $\alpha_2=1$ 表示发生作用; φ_i 为转子侧变流器限幅后电流的初始角度。

同样,由式(3),(4)可发现,与逆变电源相似,双馈风电机组所提供基频短路电流的幅值受限,基频短路电流相角受机端电压跌落系数影响,其变化为 $-90\sim 90^\circ$ 。

1.2 距离保护判据适应性分析

电网故障下,光伏和永磁直驱等逆变电源与双馈风电机组均具有短路电流幅值受限和相角受控的共性特征,本文基于该特征分析现有电网中广泛

应用的不同类型距离保护判据的适应性。本文以浙江省某地区光伏电站接入系统为例进行分析,图1为光伏电站接入系统的简化拓扑结构。

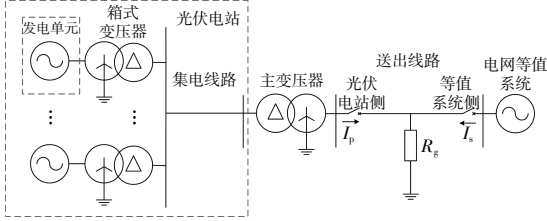


图1 含光伏电站的电网简化拓扑结构图

Fig.1 Simplified topology of power grid with PV stations

图中,送出线路上光伏电站侧和等值电网侧均会配置距离保护,光伏电站内每个发电单元的容量为1 MW,其详细电磁暂态模型见文献[23],发电单元均经过0.38 kV/35 kV的箱式变压器接入35 kV集电线路。箱式变压器短路电压百分数为6.05%,短路损耗为105 kW。35 kV集电线路长度为3.3 km,其单位长度正负序阻抗均为 $0.111+j0.377 \Omega/\text{km}$ 、零序阻抗为 $0.343+j1.152 \Omega/\text{km}$ 。35 kV/110 kV主变压器短路电压百分数为5%,短路损耗为90 kW。110 kV送出线路长度为8.943 km,单位长度正负序阻抗均为 $0.106+j0.38 \Omega/\text{km}$ 、零序阻抗为 $0.328+j1.28 \Omega/\text{km}$ 。光伏电站额定容量由单个发电单元容量和站内总发电单元数量决定,等值电网的短路容量固定为100 MV·A,等值电网的阻抗为 $8.162+j93.337 \Omega$ 。

图中,送出线路上光伏电站侧的测量阻抗为

$$Z_p = \frac{\dot{U}_p}{\dot{I}_p} = \frac{\dot{I}_p Z_{L1} + (\dot{I}_p + \dot{I}_s) R_g}{\dot{I}_p} = Z_{L1} + \left(1 + \frac{\dot{I}_s}{\dot{I}_p}\right) R_g \quad (5)$$

式中: \dot{U}_p, \dot{I}_p 分别为光伏电站侧保护安装处的电压与电流或其变化量;对于接地阻抗继电器, $\dot{U}_p = \dot{U}_\varphi, \dot{I}_p = \dot{I}_\varphi + k \cdot 3\dot{I}_{p0}, \dot{U}_\varphi, \dot{I}_\varphi$ 分别为保护安装处的相电压和相电流或其变化量; \dot{I}_{p0} 为光伏电站侧保护安装处零序电流分量或其变化量; k 为零序补偿系数,取值为 $k = (z_0 - z_1)/3z_1, z_1$ 和 z_0 分别为送出线路单位长度的正序和零序阻抗;对于相间阻抗继电器,有 $\dot{U}_p = \dot{U}_{\varphi\varphi}, \dot{I}_p = \dot{I}_{\varphi\varphi}, \dot{U}_{\varphi\varphi}$ 和 $\dot{I}_{\varphi\varphi}$ 分别为保护安装处线电压和线电流或其变化量; Z_{L1} 为故障点到光伏电站侧保护安装处的等值正序阻抗; R_g 为过渡电阻。

由于送出线路上光伏电站侧短路电流呈幅值

受限特征,因此系统侧与光伏电站侧短路电流或其变化量比值幅值 $|\dot{I}_s/\dot{I}_p|$ 通常较大,这将会放大过渡电阻 R_g 对测量阻抗的影响,从而光伏电站侧测量阻抗会变大,引起保护拒动。同时,因光伏电站侧短路电流呈相角受控特征且其变化为 $-90 \sim 90^\circ$,这会使得式(5)中 \dot{I}_s/\dot{I}_p 项相角在 $0 \sim 360^\circ$ 内变化,光伏电站侧测量阻抗的阻抗角发生偏移,引起保护不正确动作。

针对不同类型工频量和工频变化量距离保护判据,对比分析其在新能源场站接入后的动作性能,目前不同类型线路保护装置中工频量距离保护判据有所不同,分别为方向圆式、多边形形式和比相式判据。

(1) 方向圆与多边形保护判据的对比

将方向圆保护判据的动作方程写成阻抗形式为

$$|2Z_p - Z_{set}| \leq Z_{set} \quad (6)$$

式中: Z_p 为测量阻抗; Z_{set} 为整定阻抗。

整定区域以整定值的中点为圆心,整定阻抗为直径的圆,该圆通常经过坐标原点。多边形判据的整定区域通常为六边形,根据保护装置说明书中相关角度信息,结合解三角形方法,可确定出六边形的6个顶点的坐标,如图2所示。

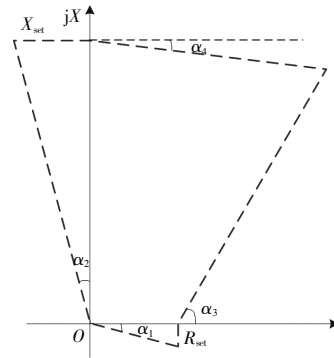


图2 多边形判据动作区域

Fig.2 Relay protection principle based on polygon equation

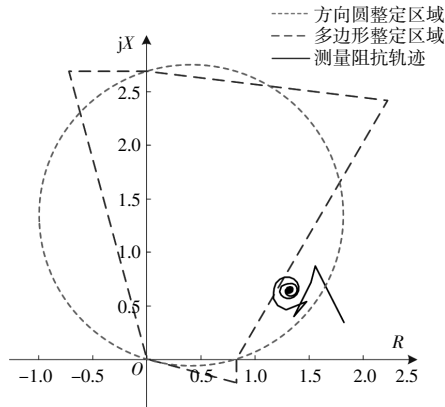
设测量阻抗 Z_p 的实部为 R_p ,虚部为 X_p ,图2中多边形判据的动作特性可表示为

$$\begin{cases} -X_p \tan \alpha_2 \leq R_p \leq R_{set} + X_p \cot \alpha_3 \\ -R_p \tan \alpha_1 \leq X_p \leq X_{set} - R_p \tan \alpha_4 \end{cases} \quad (7)$$

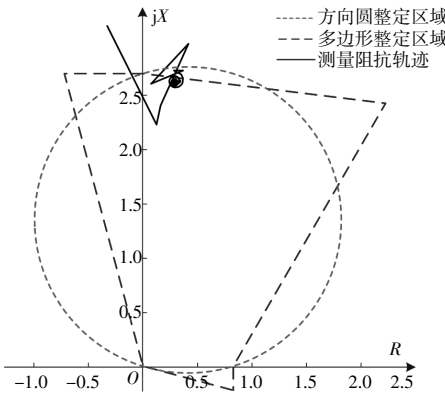
式中: R_{set} 和 X_{set} 分别为整定阻抗的实部和虚部。

结合前述参数,假定送出线路中点处发生三相接地故障,过渡电阻为 0.8Ω 。图3为新能源电

源接入容量不同情况下方向圆与多边形保护的动作曲线。



(a) 新能源与所接电网容量比约为 1/10



(b) 新能源与所接电网容量比约为 1/5

图 3 方向圆与多边形判据动作特性曲线

Fig.3 Operation characteristics of protection principles based on orientational circle and polygon equation

尽管不同容量下送出线路新能源场站侧测量阻抗轨迹有所差异,但是它们均会穿过整定边界,保护将会动作。实际上,前述两种保护判据的整定区域比较接近,若测量阻抗轨迹落入多边形与方向圆保护动作判据边界时,两种保护动作性能优劣较难评判。

(2) 方向圆与比相式保护判据对比

将比相式保护判据写成阻抗形式,其表达式为

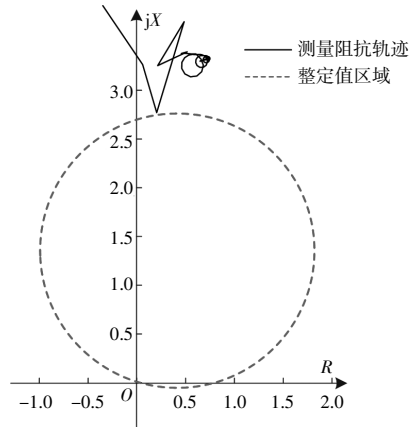
$$|2(Z_p+Z_b)-(Z_{set}+Z_b)| \leq |Z_{set}+Z_b| \quad (8)$$

式中: Z_p 为测量阻抗,由保护安装处电压变化量与电流变化量的比值得到; Z_b 为保护安装处背侧电源的等值阻抗。

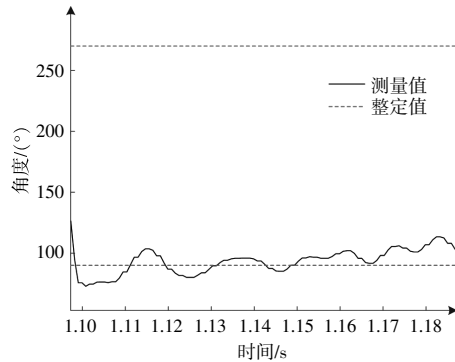
式(8)动作方程实质是将式(6)的方向圆整体沿阻抗 Z_b 方向偏移,其动作区域为不过原点的圆。因考虑了保护安装处背侧电源阻抗的变化特

性,所以新能源接入场景下比相式保护的动作特性优于方向圆。

同样,根据前述参数,假定送出线路中点处发生三相接地故障,过渡电阻为 0.8Ω 。图4为光伏电站与所接等值电源容量为4:5时,线路上新能源场站侧方向圆与比相式距离保护动作曲线。



(a) 方向圆距离保护



(b) 比相式距离保护

图 4 方向圆与比相式判据动作特性曲线

Fig.4 Operation characteristics of protection principles based on orientational circle and phase-comparison equation

由图4可以看出,测量阻抗轨迹未进入方向圆判据的动作区域,保护拒动。相比之下,测量阻抗轨迹能够进入比相式保护动作区域内,尽管保护灵敏度受到了影响,但保护可正确动作。

(3) 工频量与工频变化量判据对比

将工频变化量距离保护动作方程改写为阻抗形式:

$$|Z_{set}+Z_b| > |Z_p+Z_b| \quad (9)$$

与前述3种工频量距离保护相比,工频变化量距离保护的动作区域相当于直径为整定值、圆心为原点的全阻抗圆沿阻抗 Z_b 方向偏移。尽管也考虑了保护安装处背侧电源阻抗 Z_b 的变化特性,

但相比于比相式工频量保护,在正向故障下工频变化量保护的動作范围会缩小,导致新能源场站接入后保护易拒动。况且工频变化量距离保护中电压和电流变化量只存在于故障发生后短时间范围内,在故障稳态期间会变为零。因此,工频变化量距离保护仅能用作快速保护。

本文也假定送出线路中点处发生三相接地故障,过渡电阻为 0.8Ω 。图 5 为当光伏电站与所接等值电源容量为 4:5 时,线路上新能源场站侧工频量与工频变化量距离保护动作曲线。

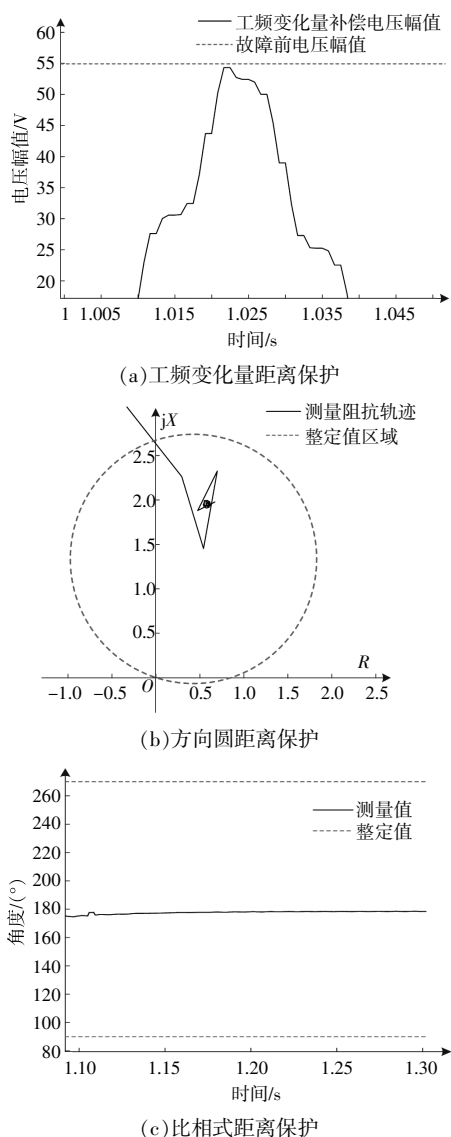


图 5 工频量与变化量保护动作特性曲线

Fig.5 Operation characteristics of fundamental frequency and its variation protection equation

由图 5 可以看出,该故障场景下工频变化量距离保护的补偿电压值小于故障前电压值,保护

拒动,而方向圆与比相式工频量保护均可正确动作,该结论与前述理论分析一致。

综上所述,在新能源接入的场景下,工频量距离保护整体优于工频变化量距离保护。同时,对比方向圆、多边形、比相式工频量距离保护可以发现,因比相式距离保护在一定程度上能够考虑新能源场站侧阻抗变化特性,所以其动作性能更优。

2 工频量提取算法的误差分析

2.1 短路电流谐波分量

针对逆变型新能源电源,电网故障下因逆变器从正常控制切换为暂态控制,会产生较大的工频量整数倍次的谐波量。在现有继电保护装置中多采用傅里叶算法提取工频量,该算法能够较好地滤除整数次谐波。因此,故障下逆变电源中较大的整数次谐波量并不会对工频量提取产生明显影响。

与逆变型新能源电源不同,双馈风电系统中绕线式异步发电机与电网直接相连,电网故障下因发电机磁链不能突变,短路电流中将包含衰减直流分量。同时,为避免电网故障下转子侧变流器因过流而受损,通常投入转子绕组上所接 Crowbar 电路^[24,29],这将会导致短路电流中含有与转子转速有关的衰减转差频率分量。故障初始阶段,这些衰减直流分量和转差频率分量在短路电流中的占比较大,会给工频量提取带来较大误差。为此,本小节首先给出双馈风电机组所提供短路电流中谐波分量表达式,进一步从定性与定量角度分析这些谐波量给工频量提取带来的误差,从而为保护装置中距离保护算法适应性评估提供依据。

Crowbar 投入后,转子绕组被短接,其电压矢量 $\dot{U}_r=0$,根据双馈风电机组电压和磁链方程,可得定子故障电流为

$$i_s = \dot{A} e^{-\alpha t} + \dot{B} e^{-\beta t} + f[\dot{U}_s(t)] \quad (10)$$

$$\begin{cases} \alpha \approx \frac{1}{\sigma_s} \\ \beta \approx \frac{1}{\sigma_r} - j\omega \\ f[\dot{U}_s(t)] \approx \frac{L_r/\sigma_r - j\omega_s L_r}{L_s L_\sigma (\tau_r - j\omega_s)} \frac{\gamma U_{sm}}{j\omega_s} e^{j\omega_s t + j\varphi} \\ \dot{A} \approx \frac{L_r/\sigma_r - L_r/\sigma_s - j\omega_s L_r}{L_s L_\sigma (-1/\sigma_s + 1/\sigma_r - j\omega_r)} \frac{(1-\gamma) U_{sm}}{j\omega_s} \\ \dot{B} \approx \left\{ \dot{i}_s^{[0]} - f[\dot{U}_s(t=0)] - \dot{A}(t=0) \right\} \end{cases} \quad (11)$$

式中： ω_r, ω 分别为转子机械角速度与转子电角速度； ω_s 为同步电角速度； $\sigma_r=(L_r L_s-L_{m2})/[L_s(R_r+R_{crow})]$ ， $L_{\sigma}=1-L_{m2}/(L_r L_s)$ ， $\sigma_s=(L_r L_s-L_{m2})/(L_r R_s)$ ， $L_s=L_m+L_{1s}$ 为发电机定子等效电感， $L_r=L_m+L_{1r}$ 为发电机转子等效电感， L_m 为发电机励磁电感， L_{1s}, L_{1r} 分别为发电机定、转子漏电感， R_s, R_r 分别为定、转子电阻， R_{crow} 为 Crowbar 电阻； U_{sm} 为故障前定子电压幅值； γ 为电压跌落系数； $s=\omega/\omega_s$ 为转差率； i_s 为故障前定子电流，大小主要受风速影响。

由式(10),(11)可知,双馈风电机组短路电流中含有较大的非周期衰减量,包括衰减时间常数接近 σ_s 的直流分量和时间常数接近 σ_r 的转差频率分量^[25]。其中,直流分量的大小主要受机端电压跌落程度影响,而转差频率分量同时受故障前机组风速和故障后机端电压跌落程度影响。

2.2 非周期谐波对工频量提取的影响

工频量提取算法的精确度对于距离保护能否正确动作有较大影响,目前主流保护装置中广泛应用的工频量提取算法为傅里叶算法。傅里叶算法具有很强的滤除整数次周期谐波、抑制非整数次周期谐波的能力。为此,后文主要分析新能源场站所提供短路电流中非周期谐波量对傅里叶算法的影响。

根据前述分析,衰减直流和转差频率分量在双馈风电场短路电流中的占比主要与机端电压跌落程度和风速相关。参考某风电场实际 1.5 MW 双馈风电机组参数,额定电压为 0.69 kV,定转子绕组匝数比为 2.637 7;定子绕组等效电阻和漏感分别为 0.008 06,0.168 p.u.;转子绕组等效电阻和漏感为 0.006,0.152 p.u.;励磁电感为 3.48 p.u.;直流母线额定电压为 1.26 kV;网侧滤波器等效电感为 0.000 4 H;转子 Crowbar 电阻为 0.5 Ω 。

本文选择最严重的故障场景,机端电压跌落程度为 0.2 p.u.,风速为额定风速,图 6 为双馈风电机组 A 相短路电流波形。

表 1 为由 Prony 算法提取出的双馈风电机组短路电流中非周期谐波量的结果。

由表 1 可以看出,衰减直流分量约为基频分量的 1/2 倍,其衰减系数与式(11)中理论计算结果基本一致。转差频率分量的频率为 60 Hz,这是由于双馈风电机组转速为 1.2 p.u.,该分量幅值约

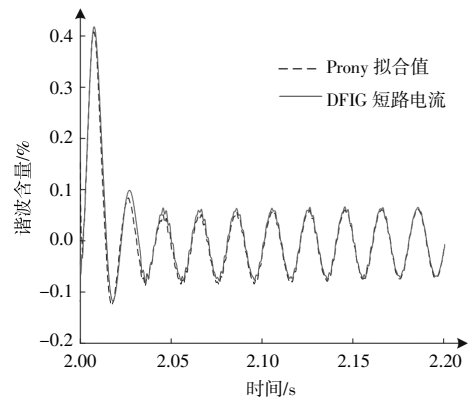


图 6 Prony 算法拟合曲线
Fig.6 Fitting curve of Prony algorithm

表 1 双馈风电机组不同频率短路电流含量
Table 1 Different frequencies current provided by doubly fed wind turbines during grid fault

频率/Hz	幅值/kA	相角/rad	衰减系数
0	0.033 4	-1.571	-9.403
50.01	0.067 3	-0.261	0.000 3
60.69	0.246 0	4.422	-85.13

为基频分量的 4 倍,其衰减系数也与式(11)中理论计算结果基本一致。

在实际工程中,根据傅里叶算法,由衰减直流分量引起的工频量计算误差为

$$F_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} A e^{-\alpha t} e^{j\omega t} dt = \frac{2A(1-e^{-\alpha T})}{T(\alpha^2 + \omega_s^2)} (\alpha - j\omega_s) \quad (12)$$

式中： T 为傅里叶算法的数据窗长,通常取为 0.02。

结合前述双馈风电机组相关参数及 Prony 算法提取结果,为了便于分析直流衰减量给工频量提取带来的误差,这里构造出的电流表达式为

$$i_1(t) = 5e^{-9.4t-j\pi/2} + 10\sin\left(100\pi t - \frac{\pi}{12}\right) \quad (13)$$

对电流 $i_1(t)$ 取一个周波的数据,结合微机保护装置中常用的采样频率,利用傅里叶算法提取工频量,其结果如表 2 所示。

表 2 含衰减直流时不同采样频率下傅里叶算法计算结果
Table 2 Calculation results of different frequencies Fourier algorithm with decaying DC components

采样 点数	采样 频率/Hz	工频量 幅值/%	幅值 误差/%	工频量 相角/(°)	相角 误差/%
12	600	10.255	2.55	-0.254	2.9
24	1 200	10.259	2.59	-0.254	2.98
48	2 400	10.260	2.60	-0.254	2.98

由表 2 可以看出,不同采样频率下,衰减直流分量给工频量提取带来的误差相对较小。从保护的角度看,可以忽略不计。

$$F_{\omega} = \frac{B}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e^{-\frac{1}{\sigma}t} \sin(\omega t + \varphi_M) e^{-j\omega t} dt = \frac{B}{T} \int_{-T/2}^{T/2} e^{-\tau t} \sin(M\omega_s t + \varphi_M) e^{-j\omega t} dt =$$

$$\frac{B \left[\frac{1}{M\omega_s} \cos\left(M\omega_s \frac{T}{2} - \varphi_M\right) - \frac{j\omega_s + \tau}{M^2\omega_s^2} \sin\left(M\omega_s \frac{T}{2} - \varphi_M\right) \right] e^{(j\omega_s + \tau)T/2}}{T \left[1 + \left(\frac{j\omega_s + \tau}{M\omega_s} \right)^2 \right]}$$

$$\frac{B \left[\frac{1}{M\omega_s} \cos\left(M\omega_s \frac{T}{2} + \varphi_M\right) - \frac{j\omega_s + \tau}{M^2\omega_s^2} \sin\left(M\omega_s \frac{T}{2} + \varphi_M\right) \right] e^{-(j\omega_s + \tau)T/2}}{T \left[1 + \left(\frac{j\omega_s + \tau}{M\omega_s} \right)^2 \right]} \quad (14)$$

式中: φ_M 为转差频率分量的初相角; M 为转差频率相对于工频量的倍数,在双馈风电机组中通常为 0.7~1.3。

同样,结合前述双馈风电机组相关参数及 Prony 算法提取结果,构造出包含衰减转差频率分量的电流函数为

$$i_2(t) = 40e^{-85.13t} \sin\left(60\pi t + \frac{10\pi}{7}\right) + 10\sin\left(100\pi t - \frac{\pi}{12}\right) \quad (15)$$

对电流 $i_2(t)$ 取 1 个周波数据,给出不同采样频率下工频量提取结果,如表 3 所示。

表 3 含转差频率分量时不同采样频率下傅里叶算法结果
Table 3 Calculation results of different frequencies Fourier algorithm with slip frequency components

采样 点数	采样 频率/Hz	工频量 幅值/%	幅值 误差/%	工频量 相角/(°)	相角 误差/%
12	600	13.481	145.31	-1.075	310.2
24	1 200	24.478	144.78	-1.083	313.3
48	2 400	24.466 1	144.66	-1.085	314

由表 3 可以看出,由于转差频率分量的含量远高于工频量,因此其对傅里叶算法提取工频量的精度影响较大,在不同采样频率下幅值误差约为 145%,相角误差大于 310%,该相角误差大主要是由于转差频率分量的相角与工频量相角相差大,傅里叶算法无法准确提取工频相角。这就意味着在故障初始阶段,由于衰减转差频率分量的存在,工频量提取误差极大,很容易引起测量阻抗大幅变化,从而导致保护误动。

另外,考虑到实际双馈风电机组的转速通常

然后,分析衰减转差频率分量给工频量提取带来的误差。根据傅里叶算法,由转差频率分量引起的工频量计算误差表达式为

为 0.7~1.3 p.u.,对应转差频率分量的频率变化为 35~65 Hz,这里进一步分析转差频率变化对工频量提取的影响。

图 7 为转差频率对工频量提取误差的影响。该误差分析中所构成的电流函数与式(15)类似,转差频率分量幅值取为 40,相角取为 $10\pi/7$ 。

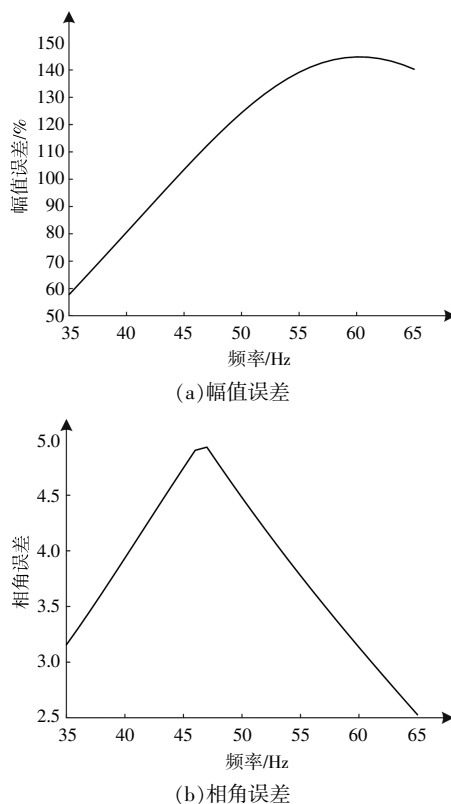


图 7 转差频率对工频量提取误差的影响
Fig.7 The influence of slip frequency on fundamental frequency extraction error

由图7可以看出:随着频率的增加,工频提取量幅值误差整体呈增长趋势,频率为60 Hz时,工频量的幅值误差达到最大;当频率为35 Hz时,幅值误差最小,为57.7%;当频率为47 Hz时,工频量的相角误差达到最大值493.17%;当频率为65 Hz时,相角误差最小,为252.74%。

3 结论

本文在计及新能源场站工频短路电流共性特征的基础上,系统分析了主流类型保护装置中不同工频量与工频变化量距离保护判据在新能源接入场景下的适应性;进一步地,通过分析新能源场站中衰减谐波量的变化规律,揭示了其对广泛应用的傅里叶算法提取工频量的影响,得出如下结论。

①针对不同工频量距离保护判据,在新能源接入场景下整体动作性能较差,其中工频量距离保护的動作性能要优于工频变化量距离保护,而在工频量距离保护中,最常用的比相式距离保护判据的動作性能更好。

②针对工频量提取算法,新能源电源短路电流中含有的衰减直流分量和转差频率分量均会对其运算精度产生影响,其中衰减转差频率分量的存在使故障初始阶段根本无法准确提取工频量信息,进而导致保护的不正确动作。

参考文献:

[1] 曾翔,文明浩,钱堃,等.逆变型分布式电源接入对接地距离保护的影响与对策[J].智慧电力,2023,51(1):46-53.

[2] 金瑞,林湘宁,时伯年.基于测量阻抗轨迹的接地距离保护自适应整定方法[J].电力系统自动化,2022,46(14):185-192.

[3] Wang Q G,Zhou N C,Ye L. Fault analysis for distribution networks with current-controlled three-phase inverter-interfaced distributed generators[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2015,30(3):1532-1542.

[4] Song J,Cheah Man E M,Prieto Araujo E,et al. Short-circuit analysis of AC distribution systems dominated by voltage source converters considering converter limitations[J].IEEE Transactions on Smart Grid,2022,13(5):3867-3878.

[5] 韩伟,刘素梅,肖超,等.计及发电单元故障特性差异

的光伏电站短路电流计算模型[J].电力系统保护与控制,2021,49(20):129-135.

[6] 原帅,奥淇仑,石静,等.基于低电压过渡控制策略的光伏系统三相稳态短路电流等值计算模型构建[J].内蒙古电力技术,2022,40(1):38-43.

[7] 杨国生,樊沛林,王聪博,等.基于能量分布的新能源场站送出线路纵联保护[J].电网技术,2023,47(4):1415-1424.

[8] 周泽昕,于溯,李勇,等.新能源经柔直送出场景下功角变化导致比相式距离保护不正确动作机制分析[J].中国电机工程学报,2023,43(5):1730-1739.

[9] 李大风,张广斌,杨毅,等.基于阻抗复数平面的自适应距离保护方案应用中的正则性问题研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(20):33-42.

[10] 陈晓乾,秦文萍,杨乐,等.逆变式电源接入下的配电网自适应距离保护方案[J].电力系统保护与控制,2023,51(11):27-38.

[11] 晁晨翔,郑晓冬,高飘,等.针对光伏场站送出线路不对称短路故障的自适应距离保护原理[J].中国电机工程学报,2022,42(18):6681-6693.

[12] 滕予非,行武,张宏图,等.风力发电系统短路故障特征分析及对保护的影响[J].电力系统保护与控制,2015,43(19):29-36.

[13] 李彦宾,贾科,毕天姝,等.逆变型电源对距离保护的影响机理分析[J].电力系统保护与控制,2018,46(16):54-59.

[14] 王晨清,宋国兵,汤海雁,等.距离保护在风电接入系统中的适应性分析[J].电力系统自动化,2015,39(22):10-15.

[15] 郑志萍,杨武盖,毛艳芳,等.间谐波对全周波傅里叶算法影响研究[J].电测与仪表,2015,52(19):30-35,48.

[16] 黄少锋,高琦,周宇聪,等.消除非周期分量影响的改进傅里叶算法[J].电力系统保护与控制,2021,49(14):21-28.

[17] 范小红,孙士云,张雪娟,等.双馈风电场短路电流特性对距离保护的影响及保护策略研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(11):18-27.

[18] 刘轶,王景钢.大型光伏电站并网暂态特性研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(7):182-187.

[19] 晁晨翔,郑晓冬,桂强,等.适用于光伏场站汇集线路的高频突变量纵联保护[J].电网技术,2022,46(12):4607-4617.

[20] 杜浩良,郑燃,李跃辉,等.含逆变型分布式电源的配电网智能分布式保护[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(12):152-158.

[21] 金恩淑,刘丹阳,夏国武.特高压换流变压器差动保护

- 适用性分析及其改进方法 [J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(1): 20-28.
- [22] 王泽彭, 刘素梅, 张道农. 基于余切相似度的风电场送出线路保护新原理[J]. 可再生能源, 2023, 41(7): 925-933.
- [23] 刘素梅, 王丹枫, 李伟, 等. 适应电流差动保护的光伏电站边界接入容量分析[J]. 可再生能源, 2023, 41(5): 644-652.
- [24] 刘素梅, 王泽彭, 毕天姝. 计及转子侧变换器控制切换模式差异的双馈风电场多机表征方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(14): 130-139.
- [25] 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.

Comparison of manufacturers' power frequency distance protection algorithms with high proportion of renewable energy

Wang Danfeng¹, Liu Sumei¹, Zheng Ran², Li Wei³, Yu Zixuan¹

(1.School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.Jinhua Power Supply Company (State Grid Zhejiang Electric Power Co.,Ltd), Jinhua 321000, China; 3.State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China)

Abstract: With the increasing connection of renewable energy power plants (REPPs), there are some problems that power frequency distance protection criterion cannot identify grid faults. Therefore, this paper focuses on the extraction algorithm of power frequency and protection criteria in the device, and analyzes the adaptability of distance protection algorithms from different manufacturers with high proportion of renewable energy power plants. Regarding the power frequency extraction algorithm, the aperiodic component characteristics of the short-circuit current provided by different renewable energy power plants were explored. The error of Fourier algorithm caused by the influence of harmonic was further derived. For the protection criteria, the adaptability of directional circle, polygon, phase comparison, and power frequency variation distance protection was compared and analyzed, and the distance protection criteria that can be well applied to high proportion of renewable energy power plants were clarified.

Keywords: renewable energy power plants; distance protection operating equation; fundamental frequency extraction; short-circuit current; harmonic component