

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

马 静,刘 静

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要: 针对分布式电源(DG)大量接入配电网后保护可靠性低的问题,提出一种基于故障稳态分量的自适应方向电流保护方案。分析不同类型 DG 的故障暂态特性以及故障等值方法,计算系统短路电流所含分量,并揭示短路电流三相分量之间的关系。在此基础上,根据故障边界条件,获取系统故障稳态分量,再结合保护安装处的测量电压及测量电流,计算保护背侧等值电压和等值阻抗,构造不同故障类型下自适应方向电流保护判据。仿真结果表明该方案不受 DG 类型、DG 出力以及系统运行方式影响,并能有效地防止电压跌落引起的延时保护拒动。

关键词: 分布式电源; 配电网; 自适应方向电流保护; 稳态分量; 继电保护; 短路电流

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.01.001

0 引言

随着新能源发电技术的不断推进,配电网中分布式电源 DG(Distributed Generation)的接入容量日益增长,以辐射形开环运行的传统配电网逐渐发展为多端电源供电的主动配电网,导致潮流分布发生大幅度变化,且运行方式和短路容量难以确定^[1-4]。基于固定动作电流的无方向过电流保护,难以对大量 DG 接入后配电网的故障情况进行正确反应,存在较高的误动、拒动的风险^[5-7]。因此,研究适用于 DG 接入的配电网电流保护,对保证配电网的安全稳定运行具有重要意义。

目前,部分专家学者已对配电网电流保护进行了深入研究:文献[8]根据 DG 最大及最小容量整定电流速断保护,可避免拒动情况的发生,但在 DG 容量大幅度变化的情况下,存在误动的可能;文献[9]根据当前运行方式和故障类型在线计算动作电流的整定值,以适应 DG 接入后系统运行方式的变化,但对 DG 故障暂态模型进行了一定程度的简化;文献[10]基于全逆变型 DG(FIDG)的详细模型,推导自适应电流速断保护整定公式,但未考虑其他类型 DG 对故障的影响。另外,鲜有针对中低压配电网电压跌落引起的延时保护拒动问题的研究。

鉴于此,本文针对配电网中 DG 类型和容量不确定的特点,提出一种基于故障稳态分量的自适应方向电流保护方案。首先,对不同类型 DG 的故障暂态特性及故障等值方法进行分析,并推导系统短路电流表达式,揭示其 3 个相分量之间的内在关联关系;在此基础上,根据故障边界条件,推导系统

故障稳态分量,再结合保护安装处的测量电压及测量电流,计算保护背侧等值电压和等值阻抗,并据此构造不同故障类型下的自适应方向电流保护判据。仿真结果验证了本文方案的正确性和有效性。

1 DG 暂态特性分析

DG 按其发电方式可分为电机型 DG、半逆变型 DG 以及全逆变型 DG。电机型 DG 的故障特性与传统发电机的故障特性相似,其故障等值模型已为人熟知。而针对全逆变型 DG 和半逆变型 DG 的故障特性的研究较少,用于系统短路电流计算的故障等值模型目前尚不明确,因此,本节主要分析半逆变型 DG 和全逆变型 DG 的故障暂态特性。

1.1 半逆变型分布式电源暂态特性分析

双馈式感应发电机(DFIG)是目前使用最广泛的半逆变型 DG,其并网系统等效电路如图 1 所示:发电系统有 2 套绕组,定子绕组直接并入电网,转子绕组通过转子侧变流器(RSC)和网侧变流器(GSC)并入电网。DFIG 在三相静止坐标系下的空间矢量数学模型^[11]如式(1)~(4)所示。

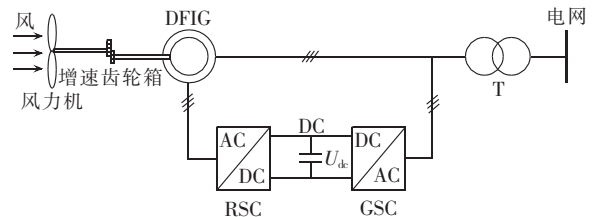


图 1 双馈式感应发电系统并网电路

Fig.1 Interconnection circuit of DFIG system

$$u_{s,abc} = R_s i_{s,abc} + p \psi_{s,abc} + j \omega_s \psi_{s,abc} \quad (1)$$

$$u_{r,abc} = R_r i_{r,abc} + p \psi_{r,abc} + j \omega_r \psi_{r,abc} \quad (2)$$

$$\psi_{s,abc} = L_s i_{s,abc} + L_m i_{r,abc} \quad (3)$$

$$\psi_{r,abc} = L_m i_{s,abc} + L_r i_{r,abc} \quad (4)$$

其中, $u_{s,abc}$ 、 $u_{r,abc}$ 和 $i_{s,abc}$ 、 $i_{r,abc}$ 分别为双馈发电机定、

收稿日期:2016-12-05;修回日期:2017-10-11

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51637005);教育部霍英东教育基金资助项目(141057)

Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China(51637005) and the Fund of Fok Ying Tung Education(141057)

转子电压和电流的空间矢量; $\psi_{s,abc}$ 、 $\psi_{r,abc}$ 分别为定、转子磁链的空间矢量; ω_s 、 ω_r 分别为系统同步角速度和转子角速度; R_s 、 R_r 分别为等效的定子电阻和转子电阻;微分算子 $p = d/dt$; L_m 、 L_s 、 L_r 分别为等效的励磁电感、定子电感和转子电感,且 $L_s = L_m + L_{ls}$ 、 $L_r = L_m + L_{lr}$, L_{ls} 、 L_{lr} 分别为定、转子漏感。

设 $t = t_0$ 时刻,系统发生三相短路,DFIG 机端电压空间矢量可表示为:

$$\mathbf{u}_{s,abc} = \begin{cases} U_{s0} e^{j\omega_s t} & t < t_0 \\ k U_{s0} e^{j\omega_s t} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, k 为机端电压幅值跌落率; U_{s0} 为机组正常运行时的机端电压幅值。

由于故障瞬间绕组磁链不变,根据式(1)~(5)可推导 DFIG 定子三相短路电流为:

$$\mathbf{i}_{s,abc} = \frac{k U_{s0} e^{j\omega_s t}}{j\omega_s L_s} - \frac{L_m \mathbf{i}_{r,abc}}{L_s} + \frac{(1-k) U_{s0} e^{j\omega_s t_0}}{j\omega_s L_s} e^{-\tau_1 t} \quad (6)$$

其中, τ_1 为定子绕组衰减时间常数。

由式(6)可知,DFIG 短路电流不仅与机端电压跌落程度即故障严重程度有关,还与转子电流相关。而转子电流受绕组磁链暂态特性和变流器控制的共同影响,计及低电压穿越优先输出无功支撑电压的控制策略,可得三相静止坐标系下转子短路电流空间矢量如式(7)所示。

$$\mathbf{i}_{r,abc} = I_{ref} e^{j\omega_s t} + f(s) (1-k) U_{s0} e^{j\omega_s t} e^{-\tau_r t} + g(k_c) I_{r0} e^{-\tau_c t} e^{j\omega_s t} \quad (7)$$

其中, I_{ref} 为转子侧变流器指令电流; s 为 DFIG 转差率; $f(s)$ 为与转差率相关的函数; I_{r0} 为机组稳定运行时的转子电流,与机组出力相关; k_c 为转子变流器参数; τ_c 为转子绕组暂态短路电流的衰减时间常数; $g(k_c)$ 为与转子变流器参数相关的函数。

由式(7)可知,转子电流由 3 个部分组成:第 1 个部分是变流器参考电流组成的工频稳态分量,第 2 个部分是反映电压跌落对转子绕组影响的转速频率暂态分量,第 3 个部分是受变流器影响的工频暂态分量。

将转子短路电流代入式(6)可得:

$$\mathbf{i}_{s,abc} = \underbrace{\frac{U_{sf} e^{j\omega_s t}}{j\omega_s L_s} - \frac{L_m I_{ref}}{L_s} e^{j\omega_s t}}_{\text{工频稳态分量}} - \underbrace{\frac{L_m f(s) (1-k) U_{s0} e^{j\omega_s t} e^{-\tau_1 t}}{L_s}}_{\text{转速频率暂态分量}} + \underbrace{\frac{L_m g(k_c) I_{r0} e^{j\omega_s t} e^{-\tau_c t}}{L_s}}_{\text{工频暂态分量}} + \underbrace{\frac{1-k U_{s0} e^{j\omega_s t_0}}{j\omega_s L_s} e^{-\tau_1 t}}_{\text{直流暂态分量}} \quad (8)$$

其中, U_{sf} 为故障后 DFIG 机端电压,即 $U_{sf} = k U_{s0}$ 。

由式(8)可知,三相短路情况下,DFIG 短路电流包含工频稳态分量、直流暂态分量、工频暂态分量、转速频率暂态分量 4 个分量,其中转速频率暂态分量与其他 3 个分量相比较小,可以忽略。

忽略定、转子漏抗,由式(8)中转子短路电流工频稳态分量可得故障稳态并联等值电路见图 2。

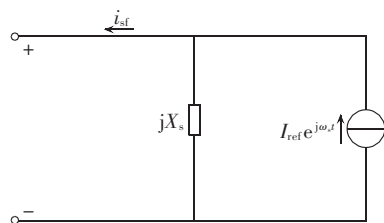


图 2 三相短路故障下 DFIG 故障稳态并联等值电路
Fig.2 Fault steady state parallel equivalent circuit of DFIG under three-phase fault

将图 2 进行戴维南等效变换可得三相短路故障下的 DFIG 故障稳态串联等值电路如图 3 所示。同理可得不对称短路故障下的 DFIG 短路电流包含工频稳态分量、直流暂态分量、工频暂态分量、转速频率暂态分量 4 个分量,其中,工频稳态分量受机端电压不对称影响,含有正序和负序分量;工频暂态分量受 DFIG 变流器三相平衡控制策略影响三相对称,与负荷电流类似。由上述分析可知,DFIG 不对称短路故障下的正序故障稳态模型与对称短路故障下的正序故障稳态模型相同。

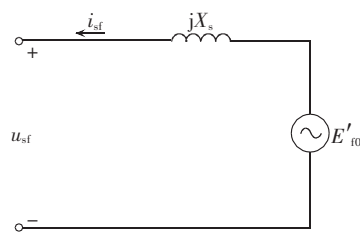


图 3 三相短路故障下 DFIG 故障稳态串联等值电路
Fig.3 Fault steady state series equivalent circuit of DFIG under three-phase fault

由图 3 可知,系统发生故障时,DFIG 故障稳态模型可等值为电压源与阻抗串联的形式^[12]。与传统电机相同的是,DFIG 的等值电压源大小在故障前后不发生突变;与传统发电机不同的是,DFIG 的等值电压源大小与 DFIG 出力有关,随风电场等值风速的变化而变化,难以作为恒定电压源参与系统短路电流计算。

1.2 全逆变型 DG 暂态特性分析

全逆变型 DG 输出电压幅值取决于直流侧电容和逆变器的控制策略,并且并网逆变器一般采用恒功率控制方式,此时变流器的暂态过程可忽略不计。再计及低电压穿越优先输出无功支撑电压的控制策略,系统发生三相短路故障时,推导可得全逆变型 DG 的短路电流^[13]为:

$$\begin{cases} I_{DG,f_q} = \min[K_{Pi}(U_{DG,f} - U_{DG,s}), -I_{\max}] \\ I_{DG,f_d} = \max(P_{\text{ref}}/U_{DG,f}, \sqrt{P_{\text{max}}^2 - I_{DG,f_q}^2}) \\ I_{DG,f} = (I_{DG,f_d} \cos \delta + I_{DG,f_q} \sin \delta) + \\ \quad j(I_{DG,f_d} \sin \delta - I_{DG,f_q} \cos \delta) \end{cases} \quad (9)$$

其中, I_{DG,f_d} 、 I_{DG,f_q} 分别为 DG 故障注入电流的 d 、 q 轴分量; $U_{DG,f}$ 、 $I_{DG,f}$ 分别为 DG 接入节点故障电压、故障电流; $U_{DG,s}$ 为 DG 额定电压; P_{ref} 为参考有功功率; δ 为 DG 功率相角; K_{Pi} 为无功支撑比例系数。

由式(9)可知,全逆变型 DG 故障电流仅含有工频稳态分量。当配电网发生对称短路故障时,全逆变型 DG 故障稳态等值模型为一个电流源,其值是 DG 并网点电压的函数,即 $I_{DG,f} = h(U_{DG,f})$ 。该等值电流源与全逆变型 DG 出力 and 电压跌落程度有关,因此电流源的大小在故障发生前后将发生突变,即戴维南等值变换下的电压源在故障前后发生突变。当配电网发生不对称短路故障时,全逆变型 DG 受逆变器三相平衡控制策略影响仅输出正序电流,故全逆变型 DG 仅存在正序故障网络,其负序等值网络开路^[14]。

2 自适应方向电流保护方案

2.1 传统自适应方向电流保护原理

配电系统发生故障后,保护背侧系统可用电压源与阻抗串联代替。自适应电流保护根据当前运行方式和故障类型,在线计算动作电流整定值,其整定公式为:

$$I_{\text{ZDZ}} = (K_{\text{rel}} K_d E_e) / (Z_e + Z_L) \quad (10)$$

其中, K_{rel} 为可靠系数; K_d 为故障类型系数,由故障类型判别结果确定,发生三相短路故障时 $K_d = 1$,发生两相短路故障时 $K_d = \sqrt{3}/2$; E_e 为保护背侧等值电势; Z_e 为保护背侧等值阻抗; Z_L 为被保护线路阻抗。

保护背侧等值阻抗等于电压及电流故障分量的比值,故障分量由故障前 1、2 个周期的测量值与故障后测量值之差计算,即 $Z_e = \Delta U / \Delta I$ 。等值电势 E_e 为:

$$E_e = U_m + I_m Z_e \quad (11)$$

其中, U_m 、 I_m 分别为保护安装处的测量电压和测量电流。

传统自适应方向电流保护根据保护安装处的电压、电流测量值在线计算保护背侧等值电路,在不同故障类型下选择不同故障类型系数,保护范围不受运行方式变化和故障类型影响。然而,传统自适应方向电流保护对系统的等值方式不能正确反映不同故障类型下不同类型 DG 的故障特性。

图 4 为接入不同类型的 DG 后简单配电系统

的等值电路。图中, E_s 和 Z_s 分别为系统侧电源等值电压和等值阻抗; I_{FDIG} 为全逆变型 DG 等值电流源; E_{DFIG} 和 Z_{DFIG} 分别为 DFIG 等值电压和等值阻抗; S_1 为待整定的保护, Z_L 为保护 S_1 的保护范围。

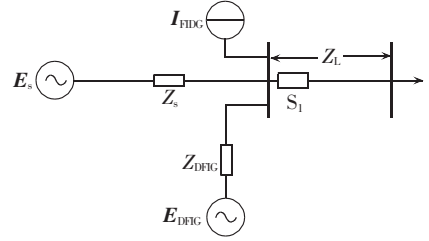


图 4 简单配电系统等值电路

Fig.4 Equivalent circuit of simple distribution network

在 S_1 的保护范围内发生接地故障后,全逆变型 DG 的等值电流源发生突变,设其为 I'_{FDIG} ,则全逆变型 DG 在故障稳态附加网络中的输出电流值为:

$$\Delta I_{\text{FDIG}} = I'_{\text{FDIG}} - I_{\text{FDIG}} \quad (12)$$

忽略转速频率暂态分量后 DFIG 注入的短路电流包括工频稳态分量、直流暂态分量、工频暂态分量;工频稳态分量如图 3 所示;工频暂态分量三相对称,可看作负荷电流波动量;设直流暂态分量为直流电流源 ΔI_{DFIG} 。因此图 4 所示的故障等值网络分解为正常状态网络、故障稳态附加网络和故障暂态附加网络,如图 5 所示,图中 U_n 为系统稳态运行时的母线电压。

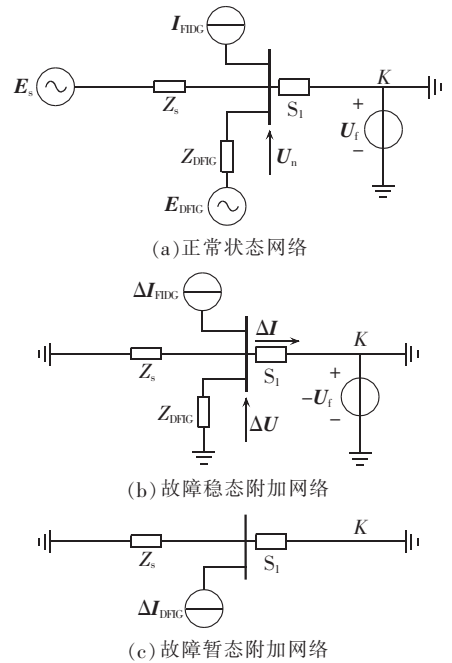


图 5 配电系统故障等值网络

Fig.5 Fault equivalent circuit of distribution network

传统自适应方向电流保护根据故障附加网络保护背侧等值电压源为 0,用突变量计算等值阻抗,然而 DG 接入后故障附加网络保护背侧含有附加电流源 ΔI_{FDIG} 和 ΔI_{DFIG} ,则 $Z_e \neq \Delta U / \Delta I$,传统自适应

电流保护不能精确计算阻抗,进而不能准确计算等值电动势,所以传统自适应电流保护不能反映含 DG 的配电网故障特性。鉴于此,本文将通过 DG 暂态特性及其对故障网络的影响,提出基于故障稳态分量的自适应方向电流速断保护原理。

2.2 自适应方向电流速断保护原理

图 5 中故障点 K 的 A 相短路电流瞬时值为:

$$i_{KA} = i_{A,1} + \Delta i_{A,f} + \Delta i_{A,FIDG} + i_{A,dh} + i_{A,cl} \quad (13)$$

其中, $i_{A,1}$ 为负荷电流分量; $\Delta i_{A,f}$ 为故障点附加电源 $-U_f$ 提供的故障稳态分量; $\Delta i_{A,FIDG}$ 为 ΔI_{FIDG} 提供的故障稳态分量; $i_{A,dh}$ 、 $i_{A,cl}$ 分别为 DFIG 提供的直流暂态分量和工频交流暂态分量。

利用快速傅里叶算法去除式(13)所示短路电流中的 DFIG 直流暂态分量,并将 $i_{A,cl}$ 看作负荷波动量后,短路电流瞬时值为频率 50 Hz 的正弦量,可借助相量法对其进行分析。故障点三相短路电流相量为:

$$\begin{cases} I_{KA} = I_{A,1} + \Delta I_{A,FIDG} + \Delta I_{A,f} \\ I_{KB} = I_{B,1} + \Delta I_{B,FIDG} + \Delta I_{B,f} \\ I_{KC} = I_{C,1} + \Delta I_{C,FIDG} + \Delta I_{C,f} \end{cases} \quad (14)$$

其中,各参数定义可参考式(13)。受全逆变型 DG 变流器三相平衡控制策略影响, $\Delta I_{A,FIDG}$ 、 $\Delta I_{B,FIDG}$ 、 $\Delta I_{C,FIDG}$ 三相对称。

下面分别针对两相短路故障和三相短路故障 2 种情况,推导自适应方向电流速断保护即自适应方向电流 I 段保护的判据。

a. 两相短路故障。

设 $t = t_0$ 时刻,图 5 中 K 点发生 BC 两相短路,则故障点的边界条件为 $I_{Af} = 0$,由于配电系统不接地,则零序分量 $I_{f(0)} = 0$,转换为各序分量有:

$$I_{f(1)} = -I_{f(2)} \quad (15)$$

设系统正、负序阻抗相等,则保护安装处的各序故障稳态分量关系为:

$$\begin{cases} \Delta I_{mf(1)} = -\Delta I_{mf(2)} \\ \Delta U_{mf(1)} = \Delta U_{mf(2)} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $\Delta I_{mf(1)}$ 、 $\Delta I_{mf(2)}$ 分别为保护安装处不含 DG 突变电流的正、负序故障电流稳态分量,下文简称为故障电流稳态分量; $\Delta U_{mf(1)}$ 、 $\Delta U_{mf(2)}$ 分别为保护安装处正、负序故障电压稳态分量。

考虑到保护安装处测量电流所含分量与短路点电流所含分量相同,因此有:

$$\begin{cases} I_{mA} = I_{mA,1} + \Delta I_{mA,FIDG} + \Delta I_{mA,f} \\ I_{mB} = I_{mB,1} + \Delta I_{mB,FIDG} + \Delta I_{mB,f} \\ I_{mC} = I_{mC,1} + \Delta I_{mC,FIDG} + \Delta I_{mC,f} \end{cases} \quad (17)$$

其中, I_{mA} 、 I_{mB} 、 I_{mC} 为保护安装处三相测量电流; $I_{mA,1}$ 、 $I_{mB,1}$ 、 $I_{mC,1}$ 为保护安装处三相负荷电流; $\Delta I_{mA,FIDG}$ 、 $\Delta I_{mB,FIDG}$ 、 $\Delta I_{mC,FIDG}$ 为保护安装处全逆变型 DG 突变电流源提供的三相故障电流稳态分量; $\Delta I_{mA,f}$ 、 $\Delta I_{mB,f}$ 、

$\Delta I_{mC,f}$ 为故障点附加电源 $-U_f$ 提供的三相故障稳态分量。

保护安装处负荷电流和全逆变型 DG 突变电流存在三相对称关系:

$$\begin{cases} I_{mA,1} = a I_{mB,1} = a^2 I_{mC,1} \\ \Delta I_{mA,FIDG} = a \Delta I_{mB,FIDG} = a^2 \Delta I_{mC,FIDG} \end{cases} \quad (18)$$

$$a = -1/2 + j\sqrt{3}/2, \quad a^2 = -1/2 - j\sqrt{3}/2$$

联立式(16)—(18)可得保护安装处正、负序故障电流稳态分量为:

$$\Delta I_{mf(1)} = -\Delta I_{mf(2)} = \frac{I_{mB} - I_{mC}}{2(a^2 - a)} - \frac{I_{mA}}{2} \quad (19)$$

根据故障电压、电流稳态分量的线性关系可得保护安装处正、负序故障电压稳态分量为:

$$\Delta U_{mf(1)} = \Delta U_{mf(2)} = \frac{U_{mB} - U_{mC}}{2(a^2 - a)} - \frac{U_{mA}}{2} \quad (20)$$

其中, U_{mA} 、 U_{mB} 、 U_{mC} 为保护安装处的三相测量电压。

上述推导过程消除了全逆变型 DG 故障突变电流和 DFIG 暂态电流的影响,即故障序分量网络中,保护背侧不再含有等值电压源,因此保护背侧等值阻抗可表示为:

$$Z_e = -\Delta U_{mf(1)} / \Delta I_{mf(1)} \quad (21)$$

同理,也可由负序分量计算等值阻抗,再利用保护测量电压及电流计算保护背侧等值电势:

$$E_e = U_m + I_m Z_e \quad (22)$$

由式(21)可得两相短路故障下,自适应电流 I 段动作电流整定公式为:

$$I_{ZLZ,1} = |(K_{rel} K_d E_e) / (Z_e + Z_L)| \quad (23)$$

其中, $K_d = \sqrt{3}/2$; $K_{rel} = 1.2$ 。

根据三相短路电流与两相短路电流的关系,当线路 αZ_L ($0 < \alpha < 1$) 处发生两相短路故障时,保护安装处故障电流大小为:

$$I_{mf} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left| \frac{E_e}{Z_e + \alpha Z_L} \right| \quad (24)$$

令 $I_{mf} = I_{ZLZ,1}$,可计算得 $\alpha < 1$ 。设 Z_e 与 Z_L 的阻抗角相等,可以求得表达式 β :

$$\beta = \frac{Z_L - (K_{rel} - 1)Z_e}{K_{rel} Z_L} < \frac{1}{K_{rel}} < 1 \quad (25)$$

当故障位置 $\alpha < \beta$ 时,故障电流大于自适应电流 I 段保护的的动作电流整定值(如式(26)所示),保护将动作。

$$I_{mf} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left| \frac{E_e}{Z_e + \alpha Z_L} \right| > \frac{\sqrt{3}}{2} \left| \frac{E_e}{Z_e + \beta Z_L} \right| = I_{ZLZ,1} \quad (26)$$

当故障位置 $\alpha > \beta$ 时,故障电流小于自适应电流 I 段保护的的动作电流整定值(如式(27)所示),保护不动作。

$$I_{mf} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left| \frac{E_e}{Z_e + \alpha Z_L} \right| < \frac{\sqrt{3}}{2} \left| \frac{E_e}{Z_e + \beta Z_L} \right| = I_{ZLZ,1} \quad (27)$$

由式(25)和(26)可知, β 即自适应电流 I 段保

护在发生两相短路故障时的保护范围, $\beta < 1$ 满足自适应方向电流 I 段保护范围小于线路全长的要求。另外,可根据式(24)自适应调整 β 中的可靠系数,同时满足保护的灵敏性和选择性要求。

由于故障点附加电源提供的稳态电流方向指向短路点,可利用 $U_{mf(1)}$ 和 $I_{mf(1)}$ 构成功率方向判据,避免保护上游发生故障时,保护下游 DG 引起保护反方向误动,功率方向判据的动作方程为:

$$\varphi_{sen} - 90^\circ < \arg \frac{U_{mf(1)}}{I_{mf(1)}} < \varphi_{sen} + 90^\circ \quad (28)$$

其中, φ_{sen} 为最大灵敏度角。

综上所述,两相短路故障下自适应电流 I 段保护的动作判据为:

$$\begin{cases} I_{mf} > I_{ZLZ, I} = |K_{rel} K_d E_e / (Z_e + Z_L)| \\ \varphi_{sen} - 90^\circ < \arg \frac{U_{mf(1)}}{I_{mf(1)}} < \varphi_{sen} + 90^\circ \end{cases} \quad (29)$$

如果连续几个采样点均满足动作判据,则保护瞬时动作,并下达断路器跳闸指令。

b. 三相短路故障。

当系统发生金属性三相短路时,短路点所在线路保护安装处的测量电压和测量电流满足:

$$U_{mf} = I_{mf} \alpha Z_L \quad (30)$$

其中, U_{mf} 、 I_{mf} 分别为保护安装处的测量电压、测量电流。

为保证自适应方向电流 I 段保护的选择性,三相短路故障下的自适应方向电流 I 段保护的整定值为:

$$I_{ZLZ, I} = |(K_{rel} U_{mf}) / Z_L| \quad (31)$$

根据式(31)易得保护范围如式(32)所示,可见三相短路故障下也可自适应地调整保护最大范围的大小。

$$\beta = 1 / K_{rel} \quad (32)$$

功率方向判据的动作方程为:

$$\varphi_{sen} - 90^\circ < \arg \frac{\Delta U_{mf}}{\Delta I_{mf}} < \varphi_{sen} + 90^\circ \quad (33)$$

其中, ΔU_{mf} 、 ΔI_{mf} 为保护安装处故障突变量。

发生三相短路故障时,流过保护的短路电流对称,保护难以根据故障点边界条件计算故障稳态分量,因此采用 2.1 节中传统自适应方向电流保护的突变量法求解 ΔU_m 、 ΔI_m 。

三相短路故障下自适应电流 I 段保护的动作判据为:

$$\begin{cases} I_{mf} > I_{ZLZ, I} = |(K_{rel} U_{mf}) / Z_L| \\ \varphi_{sen} - 90^\circ < \arg \frac{\Delta U_{mf}}{\Delta I_{mf}} < \varphi_{sen} + 90^\circ \end{cases} \quad (34)$$

2.3 自适应限时电流速断保护原理

2.3.1 自适应限时电流速断保护整定

传统限时电流速断保护即电流 II 段保护按照

躲过下级电流 I 段保护的动作电流值离线整定,然而自适应保护方案采用在线整定方式,不能提前获得下级线路 I 段保护的整定值。另外,配电系统是中低压网络,故障发生时伴随严重的电压跌落,限时电流速断保护背侧等值电势会发生很大变化,因此传统预设整定值的整定方式下自适应电流 II 段保护拒动风险高。因此提出自适应方向限时电流速断保护,根据测量值在线整定,提高保护对电压跌落的适应性和灵敏性,确保故障可靠切除。

利用 2.2 节所述方法对自适应电流保护背侧进行等值,为保证自适应电流 II 段保护范围不超过下级保护 I 段的动作范围,自适应电流 II 段保护的整定值如式(35)、(36)所示。

两相短路故障下:

$$I_{ZLZ, II} = \left| \frac{K_{rel} K_d E_e}{(Z_e + Z_{sL} + \beta_{nL} + Z_{nL}) K_b} \right| \quad (35)$$

三相短路故障下:

$$I_{ZLZ, II} = \left| \frac{K_{rel} U_m}{(Z_e + Z_{sL} + \beta_{nL} + Z_{nL}) K_b} \right| \quad (36)$$

其中, Z_{sL} 为本线路阻抗; Z_{nL} 为下级线路阻抗; β_{nL} 为下级线路 I 段保护范围,由式(25)和式(32)计算; K_b 为分支系数;其他变量含义参考 2.2 节。

在低电压穿越过程中,电压跌落可能使得自适应电流 II 段保护的整定值更接近负荷电流,仍需结合功率方向判据实现故障定位。自适应电流 II 段保护的动作判据如式(37)、(38)所示。

三相短路故障下:

$$\begin{cases} I_{mf} > I_{ZLZ, II} = \left| \frac{K_{rel} U_m}{(Z_e + Z_{sL} + \beta_{nL} + Z_{nL}) K_b} \right| \\ \varphi_{sen} - 90^\circ < \arg \frac{\Delta U_{mf}}{\Delta I_{mf}} < \varphi_{sen} + 90^\circ \end{cases} \quad (37)$$

两相短路故障下:

$$\begin{cases} I_{mf} > I_{ZLZ, II} = \left| \frac{K_{rel} K_d E_e}{(Z_e + Z_{sL} + \beta_{nL} + Z_{nL}) K_b} \right| \\ \varphi_{sen} - 90^\circ < \arg \frac{U_{mf(1)}}{I_{mf(1)}} < \varphi_{sen} + 90^\circ \end{cases} \quad (38)$$

多个采样周期内满足功率方向判据的动作方程,并延时 Δt 后自适应电流 II 段保护动作。

2.3.2 分支系数的计算

为保证自适应电流 II 段保护能覆盖本线路全长,采用 DG 额定容量计算最大分支系数,避免 DG 助增电流引起保护拒动。保护方案利用边界条件和 DG 突变电流源三相平衡条件,推导不含突变电源的故障稳态分量,因此 DFIG 和全逆变型 DG 均可用电压源与阻抗串联等值,故障前后电压源大小不变。

下级线路短路时分支系数对自适应电流 II 段保护的影响可由图 6 表示。由图 6 可知,保护 S_1 受 DFIG 和全逆变型 DG 助增影响,电流值小于保护 S_2

处的电流,分支系数可由式(39)计算。为计算最大分支系数,系统阻抗采用最大值即系统最小运行方式计算,DFIG 和全逆变型 DG 等值阻抗采用最小值即额定容量计算。

$$K_b = I_{BC} / I_{AB} = 1 + (Z_s + Z_{AB}) / (Z'_{DFIG} // Z'_{FIDG}) = 1 + (Z_s + Z_{AB}) (Z'_{DFIG} + Z'_{FIDG}) / (Z'_{DFIG} Z'_{FIDG}) \quad (39)$$

其中, Z_{AB} 为线路 L_{AB} 的阻抗标幺值; Z'_{DFIG} 为 DFIG 阻抗标幺值, $Z'_{DFIG} = Z_{DFIG} (U_s / E'_{DFIG})^2$, U_s 为 DFIG 额定电压幅值, E'_{DFIG} 由 DFIG 出力计算; $Z'_{DFIG} // Z'_{FIDG}$ 为 DG 并联阻抗,多个 DG 接入时计算方法类似; Z'_{FIDG} 为全逆变型 DG 阻抗标幺值, $Z'_{FIDG} = I_s / I_{FIDG}$, I_s 为 DFIG 额定电流幅值,发生两相短路故障时 I_{FIDG} 由全逆变型 DG 额定容量计算,发生三相短路故障时 I_{FIDG} 为变流器电流阈值。

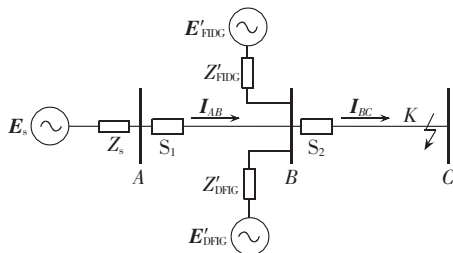


图 6 下级线路发生故障时分支系数对电流保护的影响

Fig.6 Influence of branch coefficient on current protection when fault occurs on neighboring line

自适应方向电流保护方案在进行故障等值时详细考虑了半逆变型 DG 和全逆变型 DG 的故障暂态特性,可以对配电网故障情况作出准确的反应。对于具有低电压穿越能力的全逆变型 DG 可等效为异步电机,忽略高频暂态分量后仍可采用本文所述方法进行等值。此外,自适应方向电流保护方案根据测量值在线计算,可以避免低电压穿越后 DG 短路电流迅速减小引起的保护拒动情况。

3 仿真实验

3.1 配电仿真系统

为了验证本文所提的自适应方向电流保护方案的正确性,在 DIgSILENT 平台搭建 10 kV 配电系统,并在系统中的不同位置接入不同类型 DG,仿真系统如图 7 所示。系统基准容量为 100 MV·A,基准电压为 10.5 kV。线路 L_{AB} 、 L_{AC} 、 L_{CD} 、 L_{DE} 为架空线路,线路长度分别为 3 km、4 km、4 km、5 km,线路参数为: $x_1 = 0.471 \Omega/\text{km}$, $r = 0.334 \Omega/\text{km}$ 。母线 B 处接有小型光伏电站组成的全逆变型 DG FIDG₁,其额定容量为 24 MV·A。母线 C 处接有小型光伏电站组成的全逆变型 DG FIDG₂,其额定容量为 20 MV·A。母线 D 处接有 8 台并联的 DFIG(额定容量为 16 MV·A),在变流器电流越限时 DFIG 投入撬棒保

护电路,实现低电压穿越,等效为异步电机运行。在不同故障位置 and 不同风机出力下,设置三相短路及两相短路故障,将保护安装处的测量值与整定值进行对比,分析本文保护方案的正确性和有效性。

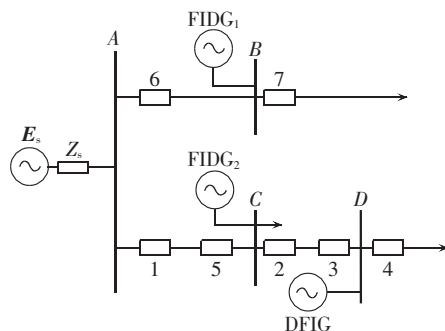
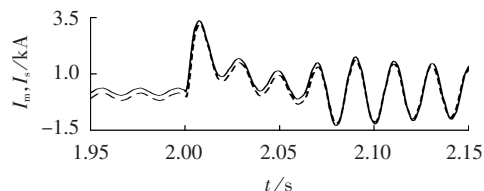


图 7 10 kV 配电系统图

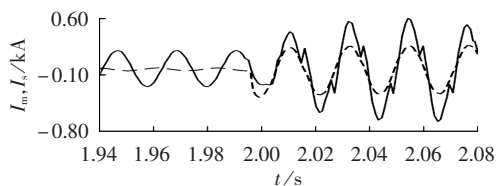
Fig.7 10 kV distribution network

3.2 故障稳态分量分析

图 8 为线路 L_{CD} 中点处发生三相短路和两相短路故障时保护安装处的测量电流与故障稳态分量的对比图。



(a) 三相短路故障下测量电流与故障稳态分量



(b) 两相短路故障下测量电流与故障稳态分量

图 8 不同故障下测量电流与故障稳态分量对比图

Fig.8 Comparison between measured current and fault steady state component under different faults

由图 8(a)可知,三相短路故障下,系统侧电流曲线较为光滑,谐波分量较少,由于去除了负荷电流,故障稳态分量的幅值小于测量值的幅值。由图 8(b)可知,DG 侧保护在两相短路故障下含有较大的谐波分量,而故障稳态分量曲线较为光滑,幅值较为稳定。可见,本文等值方法有效地去除了 DG 突变电流的影响。

3.3 三相短路故障仿真

a. $t = 2 \text{ s}$ 时,在线路 L_{CD} 中点以及点 D 分别发生三相短路故障,以保护 2 作为系统侧保护研究对象,其动作特性曲线如图 9 所示,图中 $I_{ZZL,1}$ 、 I_{2mf} 分别为保护 2 的自适应方向电流 I 段保护的整定值和测

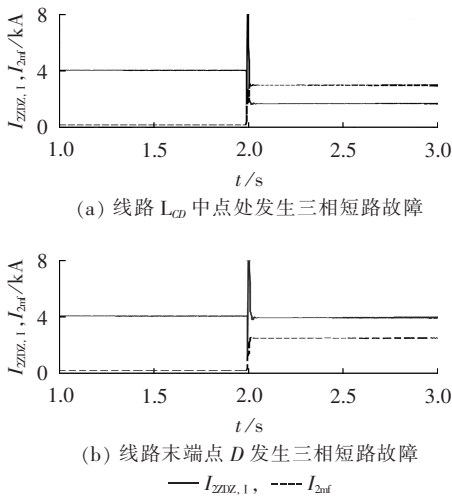


图 9 保护 2 自适应电流 I 段保护动作特性曲线
Fig.9 Action characteristic curve of adaptive current
Zone I in protection 2

量电流。

三相短路故障对应的背侧阻抗变化曲线如图 10 所示,由图可见在三相短路故障发生后,可由故障网络稳态分量自适应地计算出系统背侧阻抗。

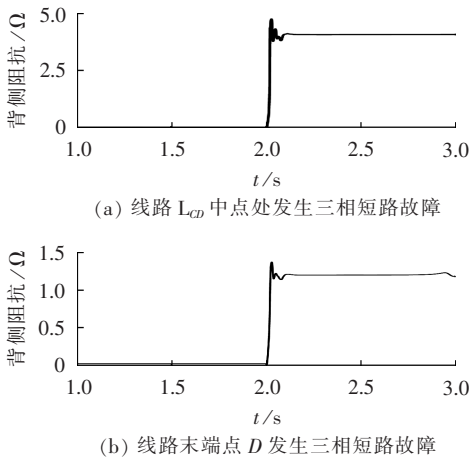


图 10 保护 2 自适应背侧等值阻抗计算结果
Fig.10 Calculation results of adaptive equivalent
impedance in protection 2

b. $t=2\text{ s}$ 时,在线路 L_{cd} 中点处以及点 C 分别发生三相短路故障,选取保护 3 为 DG 侧研究对象,保护 3 自适应方向电流 I 段和 II 段的动作特性曲线分别如图 11、图 12 所示,图中 $I_{3ZIV,1}$ 、 $I_{3ZIV,II}$ 、 I_{3mf} 分别为保护 3 的自适应方向电流 I 段整定值、自适应方向电流 II 段整定值、测量电流。

由图 11 可见,保护 3 的自适应方向电流 I 段在线路 L_{cd} 中点处发生故障时可靠动作,线路末端点 C 处发生故障时不动作。由于故障发生后 DG 侧保护无系统电源支撑电压,短路电流暂态分量含量更大,导致保护整定值波动更大。且 DG 容量比系统电源小得多,因此 DG 侧保护处流经的短路电流比系统侧保护电流小,本文所提自适应方向电流

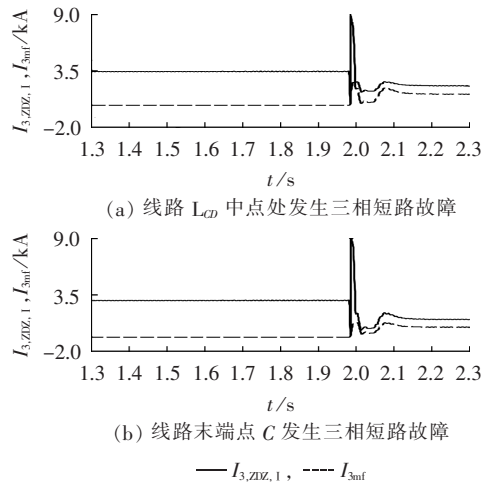


图 11 保护 3 自适应电流 I 段动作特性曲线
Fig.11 Action characteristic curve of adaptive current
Zone I in protection 3

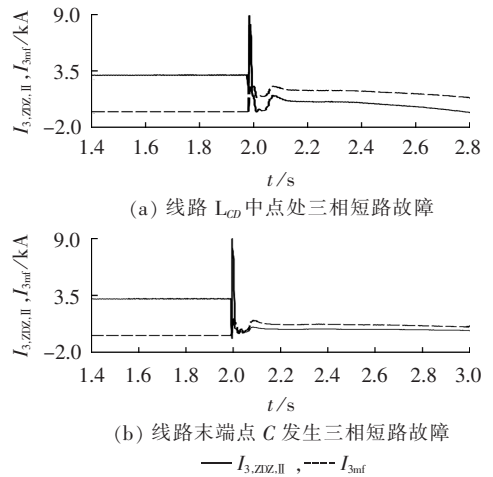


图 12 保护 3 自适应电流 II 段动作特性曲线
Fig.12 Action characteristic curve of adaptive current
Zone II in protection 3

保护方案根据当前运行方式和故障情况自适应计算整定值,保证了故障有选择的切除。

由图 12 可见,保护 3 的自适应方向电流 II 段在线路 L_{cd} 中点处和线路末端点 C 处发生故障时均能可靠动作,保护灵敏度较高。在线路 L_{cd} 中点处发生三相短路故障时,DFIG 机端电压跌落较为严重,引起撬棒保护动作,进而导致 DFIG 输出电流减小。从图 12(a)中可以看出,随着保护测量电流不断减小,自适应方向电流 II 段保护的整定值也随之减小,确保保护在延时后仍能可靠动作。

3.4 两相短路故障仿真

a. $t=2\text{ s}$ 时在线路 L_{AC} 中点以及点 C 分别发生两相短路故障,选取系统侧保护 1 为研究对象,其动作特性曲线如图 13 所示,图中 $I_{1ZIV,1}$ 、 I_{1mf} 分别为保护 1 自适应电流 I 段整定值和测量电流。

系统发生两相短路故障后短路电流较小,传统电流保护易拒动。本文方案通过提取故障稳态

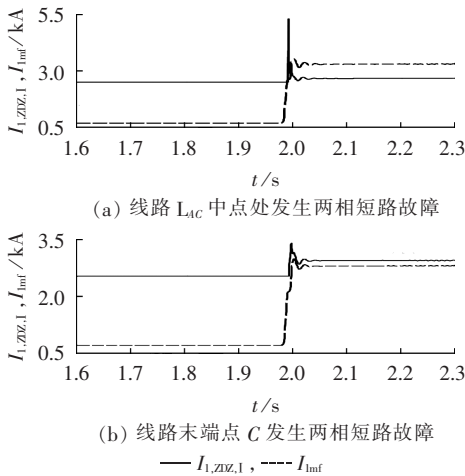


图 13 保护 1 自适应电流 I 段动作特性曲线
Fig.13 Action characteristic curve of adaptive current
Zone I in protection 1

分量,精确计算出保护背侧等值阻抗和等值电势,整定策略不受负荷影响,动作性能良好。由图 13 可知,在线路 L_{4C} 中点处发生两相短路故障时,保护 1 能可靠动作,灵敏度较好。在线路 L_{4C} 末端发生两相短路故障时保护 1 不动作,保证了电流 I 段选择性。

b. $t=2\text{ s}$ 时,分别在线路 L_{4C} 中点处以及点 A 设置两相短路故障,选取 DG 侧保护 5 作为研究对象,其动作特性曲线如图 14 所示,图中 $I_{5,ZI,1}$ 、 I_{5mf} 分别为保护 5 自适应方向电流 I 段整定值和测量电流。由图 14 可见:由于保护 5 背侧 DG 容量较大,且发生两相短路故障时电压跌落较小,DG 可持续输出电流,因此发生两相短路故障时流经保护 5 的短路电流衰减幅度比发生三相短路故障时小;同时,受多个 DG 暂态电流影响,测量电流的暂态过程较长、波动性较大,在此情况下保护不受 DG 暂态特性影响,仍能正确工作。

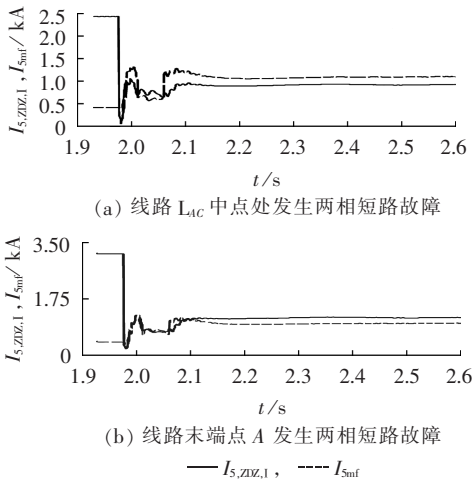


图 14 保护 5 自适应电流 I 段动作特性曲线
Fig.14 Action characteristic curve of adaptive current
Zone I in protection 5

为验证自适应电流保护方案不受 DG 出力大小影响,当 DFIG 接入不同容量时在线路 L_{CD} 中点处设置故障并对两侧保护的動作特性进行分析,分析结果如表 1 所示。

表 1 不同 DG 容量下保护动作特性
Table 1 Protection operational characteristics under different DG capacities

DFIG 容量 / (MV·A)	I_{3mf} /kA	$I_{3ZI,1}$ /kA	保护 3 方向	保护 5 方向	β /%
16	2.08	1.31	+	-	72.6
10	1.63	1.01	+	-	71.1
6	1.25	0.97	+	-	71.4
4	1.21	0.92	+	-	70.8

由表 1 可见,随着 DFIG 接入容量的不断减小,流经保护 3 的电流不断减小,同时保护 3 的自适应电流 I 段整定值也随之减小。根据式 (25) 计算保护 3 的保护范围 β ,在 DFIG 接入容量减小时保护 3 的保护范围 β 可维持在 70% 以上。同时,保护 5 的故障分量功率方向为负,发生区外故障时保护 5 不发生误动。

4 结论

本文提出基于 DG 接入后故障稳态分量的自适应方向电流保护方案,通过分析不同类型 DG 的故障暂态特性,利用就地测量保护安装处故障电压及故障电流,结合当前运行方式和故障类型,实现含 DG 的配电网电流保护在线整定计算。该方法具有以下特点:

- a. 故障等值方法考虑了全逆变型 DG 和半逆变型 DG 的故障暂态特性,形成了统一的自适应方向电流保护判据,该判据不受 DG 类型影响,适应能力强;
- b. 在不同运行方式和故障类型下,利用测量电流和电压根据不同判据在线计算整定值,可靠性较高;
- c. 自适应限时电流速断保护在应对电压跌落和低电压穿越等情况时可正确动作,灵敏度较高。

参考文献:

[1] BALAMURUGAN K,SRINIVASAN D. Review of power flow studies on distribution network with distributed generation[C]// 2011 IEEE Ninth International Conference Power Electronics and Drive Systems(PEDS). Singapore:IEEE,2011:411-417.
[2] LIU B,ZHANG Y. Power flow algorithm and practical contingency analysis for distribution systems with distributed generation[J]. European Transactions on Electrical Power,2009, 19(6):880-889.
[3] ALWASH S F, RAMACHANDARAMURTHY V K,MITHULANAN N N. Fault-location scheme for power distribution system with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015,30(3):1187-1195.
[4] 刘健,林涛,同向前,等. 分布式光伏电源对配电网短路电流影

- 响的仿真分析[J]. 电网技术,2013,37(8):2080-2085.
- LIU Jian,LIN Tao,TONG Xiangqian,et al. Simulation analysis on influences of distributed photovoltaic generation on short-circuit current in distribution network[J]. Power System Technology,2013,37(8):2080-2085.
- [5] ZENG C,LIU X,FU W,et al. Power flow analysis of distribution network containing distributed generation based on sequence operation[C]//2014 International Conference on Power System Technology(POWERCON). Chengdu,China:IEEE,2014:2580-2584.
- [6] 高厚磊,李娟,朱国防,等. 有源配电网电流差动保护应用技术探讨[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(5):40-44.
- GAO Houlei,LI Juan,ZHU Guofang,et al. Study on application technology of current differential protection in active distribution network[J]. Power System Protection and Control,2014,42(5):40-44.
- [7] 周念成,贾延海,赵渊. 一种新的配电网快速保护方案[J]. 电网技术,2005,29(23):68-73.
- ZHOU Niancheng,JIA Yanhai,ZHAO Yuan. A new high-speed protection scheme for distribution network[J]. Power System Technology,2005,29(23):68-73.
- [8] 吴立杰,陈星莺,徐石明,等. 考虑电流保护可靠性的分布式电源准入容量研究[J]. 电网与清洁能源,2015,31(3):35-39.
- WU Lijie,CHEN Xingying,XU Shiming,et al. Calculating the maximum penetration capacity of distributed generation considering current protection[J]. Power System and Clean Energy,2015,31(3):35-39.
- [9] 索南加乐,张健康,宋国兵,等. 基于故障类型的故障分量提取算法[J]. 电力系统自动化,2005,29(3):13-16.
- SUOLAN Jiale,ZHANG Jiankang,SONG Guobing,et al. Novel algorithm based on fault type to extract fault component[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(3):13-16.
- [10] 孙景钊,李永丽,李盛伟,等. 含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护[J]. 电力系统自动化,2009,33(14):71-76.
- SUN Jingliao,LI Yongli,LI Shengwei,et al. Study on adaptive current instantaneous trip protection scheme for distribution network with inverter interfaced DG[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(14):71-76.
- [11] 马静,蓝新斌,丁秀香,等. 考虑网侧控制与机端相位跳变的双馈风电机组对称故障暂态特性研究[J]. 电网技术,2014,38(7):1891-1897.
- MA Jing,LAN Xinbin,DING Xiuxiang,et al. Transient characteristics of symmetrical short circuit fault in double fed induction generators considering grid-side converter control and phase-angle jump of DFIG's terminal voltage[J]. Power System Technology,2014,38(7):1891-1897.
- [12] 欧阳金鑫,熊小伏. 接入配电网的双馈风力发电机短路电流特性及影响[J]. 电力系统自动化,2010,34(23):106-110.
- OUYANG Jinxin,XIONG Xiaofu. Characteristics of short-circuit current of wind turbine driven DFIG and its impacts on grid-connected distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(23):106-110.
- [13] 潘国清,曾德辉,王钢,等. 含PQ控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(4):555-561.
- PAN Guoqing,ZENG Dehui,WANG Gang,et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(4):555-561.
- [14] 陈理. 分布式发电装置控制系统的设计和研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.
- CHEN Li. Design and research of control system for distributed generation plant[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2006.

作者简介:



马静

马静(1981—),男,山西阳泉人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:hdmajing@163.com);

刘静(1994—),男,河南驻马店人,硕士研究生,研究方向为电力系统配电网保护与控制。

Adaptive directional current protection scheme based on steady state component in distribution network with DG

MA Jing,LIU Jing

(School of Electrical and Electronic Engineering,North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: Aiming at the poor reliability problem of traditional protection in the distribution network with DG(Distributed Generation),an adaptive directional current protection scheme based on steady state component is proposed. By analyzing the fault transient characteristics and fault equivalent methods of different kinds of DG,components of short circuit current are calculated,and the relationship between three phase components of the short circuit current are revealed. Based on this,the steady state component of system is obtained according to the fault boundary conditions. Then,combined with the measured voltage and current at the relay installation point,the equivalent voltage and the equivalent impedance at backside of relay protection are calculated,with which,an adaptive directional current protection criterion under different fault conditions is established. Simulative results show that immune to DG types,DG output and system operating modes,the proposed scheme can effectively prevent the time relay failure caused by voltage drop.

Key words: distributed power generation; distribution network; adaptive directional current protection; steady state component; relay protection; short circuit currents