

基于自适应阻抗继电器的风电T接线路纵联保护方案

郑涛¹, 赵裕童¹, 陈璨², 李菁¹, 王增平¹

(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. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045)

摘要: 风电的T型接入改变了系统拓扑和故障特性, 导致继电保护整定与配合困难, 传统距离保护应用于风电T接线路时存在适应问题。基于风电T接线路拓扑, 分析了双保护方向对保护范围的影响, 推导了测量阻抗表达式并提取了主要影响参数, 指出风电的T型接入影响距离保护的动作性能; 鉴于此, 提出了基于自适应阻抗继电器的风电T接线路纵联保护方案。该方案实现了保护方向的唯一化, 且保护动作区域能够根据过渡电阻、三端电源电势幅值比、相位差和风电电源等效序阻抗的变化进行自适应调整, 提高了保护的可靠性和灵敏性。同时给出了自适应整定阻抗的具体计算方法, 一定程度上降低了保护对通信系统的要求。仿真结果验证了所提保护方案的正确性和有效性。

关键词: 继电保护; 纵联保护; 风电T接线路; 适应性分析; 测量阻抗; 自适应阻抗继电器; 计算方法

中图分类号: TM 614; TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.02.011

0 引言

随着风电技术的不断发展与完善, 中国风电装机容量迅速增加。与常规电源相比, 风电电源结构特殊、故障特性复杂多变^[1-2], 其大规模接入给按照常规电源配置的继电保护选择性、灵敏性和可靠性带来巨大挑战^[3-6]。距离保护具有保护区稳定、灵敏性好、躲负荷能力强和动作情况受系统运行方式变化影响小等优点^[7], 因此研究其在风电接入系统中的适应性对保证电网安全可靠运行、提高风电场并网稳定性具有重要意义。

近年来, 已有部分学者着手研究风电接入对系统距离保护的影响^[8-12]。文献[8]指出故障期间风电场送出线的电压、电流主频不同, 并分析了该特性对距离保护动作性能的影响。文献[9-10]建立了风电场联络线的测量阻抗数学模型, 研究了风电场运行参数对距离保护的影响。文献[11]从基本原理角度推导了各距离保护元件的最佳应用条件, 并结合风电电源的故障特征给出了距离保护适应性的一般结论。文献[12]研究了风电系统的低电压穿越特性和弱馈特性, 指出撬棒的投入和风电场的弱馈性可能导致阻抗继电器的计算精度降低。2012年, 国网公司企业标准 Q/GDW738—2012《配电网规划设计技术导则》^[13]指出在110 kV网络中, 风电可采

用T接方式并网, 而以上研究大部分局限于非T接并网的风电电源。目前鲜有文章涉及风电T接并网系统的距离保护问题。风电T接线路为多端电源供电系统, 其结构特征和风电电源的故障特征共同作用于距离保护, 对其产生重要影响, 亟待深入研究。文献[14]针对风电T接线路, 提出了改进的纵联电流差动保护, 但并未研究距离保护。文献[15]研究了风电T接前后测量阻抗的变化规律, 分析了故障位置、风电出力等对距离保护的影响, 但研究仅局限于定性分析, 未给出准确的测量阻抗表达式, 更未深入研究风电的T型接入对系统距离保护的影响机理和相应的对策。

针对目前风电T接线路中距离保护研究的欠缺, 本文首先从保护范围和测量阻抗2个角度出发, 分析了传统距离保护在风电T接线路中的适应性, 指出风电的T型接入可能导致T接线路三侧距离保护的保护区缩小、灵敏度下降, 甚至引起保护拒动或误动。为解决上述问题, 本文提出了基于自适应阻抗继电器的风电T接线路纵联保护方案, 并给出了自适应整定阻抗的计算方法。最后通过建模仿真验证了所提保护方案的正确性和有效性。

1 传统距离保护适应性分析

1.1 风电T接系统介绍

风电电源采用T接方式并网后形成T接线路, 其结构如图1所示。图中, E_M 、 E_N 为常规电源等效电势; E_W 为风电电源等效电势; ①、②、③所在位置为保护安装点; 3条分支线路的长度分别记为

收稿日期: 2017-01-06; 修回日期: 2017-11-08

基金项目: 国家重点研发计划(973计划)资助项目(2016Y-FB0900600)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(973 Program) (2016YFB0900600)

L_{MT} 、 L_{NT} 、 L_{WT} , 点 k_1 、点 k_2 、点 k_3 分别为所在分支线路的中点; I_{ML} 、 I_{NL} 、 I_{WL} 分别为故障前流过三侧母线的负荷电流。

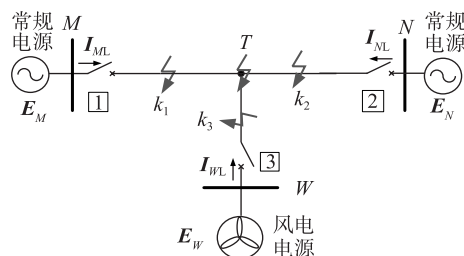


图 1 风电 T 接系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of power transmission line with T-type wind power connection

从图 1 中可以看到, 风电 T 接线路为三端电源供电系统, 其每侧保护均有 2 个保护方向 (简称双保护方向), 如 M 侧保护方向有 $M \rightarrow N$ 和 $M \rightarrow W$ 。本文分析均假设 T 接线路的 M 侧、 N 侧为常规电源, W 侧为风电电源。

由于风电电源包含非线性的电力电子器件, 其暂态电势在故障期间不能维持恒定, 风电电源等效阻抗的具体形式尚不明确, 其值取决于参与发电的风电机组数量以及故障暂态控制作用^[16]。但按照对称分量法, 故障附加网络中保护实际感受到的风电电源等效正、负序阻抗可以分别根据式 (1)、(2) 计算。

$$Z_{W1} = -\frac{\Delta U_{W1}}{\Delta I_{W1}} \quad (1)$$

$$Z_{W2} = -\frac{U_{W2}}{I_{W2}} \quad (2)$$

其中, ΔU_{W1} 、 ΔI_{W1} 分别为风电电源出口的正序电压、电流故障分量; U_{W2} 、 I_{W2} 分别为故障后风电电源出口的负序电压、电流。

1.2 传统整定方案保护范围分析

距离保护 I 段为无延时的速动段, 按照传统整定方案^[7], 其整定阻抗 (以 M 侧保护为例) 应为:

$$Z_{Mset}^I = \min K_{rel}^I \{L_{M \rightarrow N}, L_{M \rightarrow W}\} Z_1 \quad (3)$$

其中, Z_{Mset}^I 为 M 侧距离 I 段整定阻抗; K_{rel}^I 为距离 I 段可靠系数, 一般取 0.8~0.85; $L_{M \rightarrow N}$ 、 $L_{M \rightarrow W}$ 为各自保护方向上的线路总长度, 即 $L_{M \rightarrow N} = L_{MT} + L_{NT}$, $L_{M \rightarrow W} = L_{MT} + L_{WT}$; Z_1 为线路单位长度正序阻抗。

分析式 (3) 可知, 为保证选择性, 风电 T 接线路的距离 I 段整定阻抗应取 2 个保护方向中的最小值, 因此相较于风电 T 接前的双端电源系统保护, 其保护范围缩小、灵敏度下降。若 3 条分支线路的长度差异明显, 则距离 I 段可能出现保护盲区, 如图 2

所示, 图中, 阴影区域表示各侧距离 I 段的保护范围。

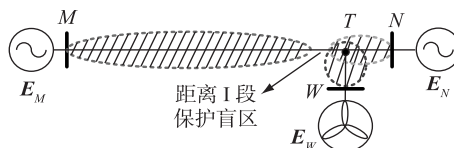


图 2 距离 I 段保护盲区

Fig.2 Dead zone of distance protection section-I

1.3 测量阻抗推导及分析

以 M 侧保护为例, 线路 MT 上的点 k_1 发生 A 相接地故障时, 计算 M 侧测量阻抗。图 3、图 4 分别为相应的故障附加正序网和故障附加复合序网。图中, U_f 为故障点正常运行电压; Z_{Mf1} 为故障点到母线 M 的线路正序阻抗; Z_{Tf1} 、 Z_{Tf2} 、 Z_{Tf0} 分别为故障点到点 T 的线路正序、负序、零序阻抗; Z_{LM1} 、 Z_{LN1} 、 Z_{LW1} 分别为分支线路 MT 、 NT 、 WT 的正序阻抗; Z_{SM1} 、 Z_{SN1} 、 Z_{SW1} 分别为 M 侧、 N 侧、 W 侧电源的等效正序阻抗; $Z_{W1} = Z_{SW1} + Z_{LM1}$ 、 $Z_{M1} = Z_{SM1} + Z_{Mf1}$ 、 $Z_{N1} = Z_{SN1} + Z_{LN1}$, Z_{W2} 、 Z_{M2} 、 Z_{N2} 和 Z_{W0} 、 Z_{M0} 、 Z_{N0} 分别为 Z_{W1} 、 Z_{M1} 、 Z_{N1} 对应的负序分量和零序分量; ΔI_{M1} 、 I_{M2} 、 I_{M0} 分别为流过母线 M 的正序故障分量电流、负序电流和零序电流。

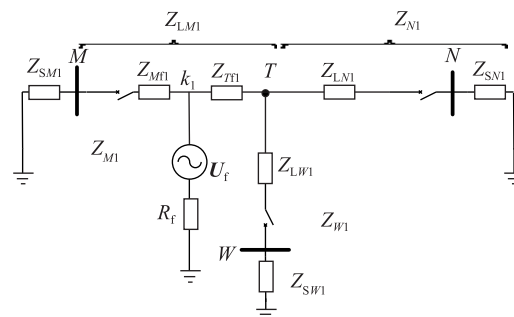


图 3 故障附加正序网

Fig.3 Additional positive sequence fault network

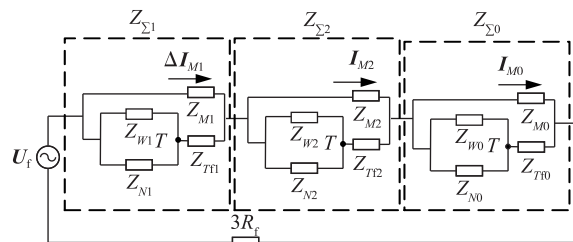


图 4 发生单相接地短路时的故障附加复合序网

Fig.4 Additional composite sequence fault network when single-phase grounding fault occurs

发生故障前, T 接线路三端的电压、电流满足以下关系:

$$\begin{cases} E_M - I_{ML}(Z_{M1} + Z_{T1}) = \\ E_N - I_{NL}Z_{N1} = E_W - I_{WL}Z_{W1} \\ I_{ML} + I_{NL} + I_{WL} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

发生故障后,短路点的各序电流为:

$$I_{f1} = I_{f2} = I_{f0} = \frac{U_f}{Z_{\Sigma M} + 3R_f} \quad (5)$$

其中, $Z_{\Sigma M} = Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 2} + Z_{\Sigma 0}$ 。

流过母线 M 的 A 相短路电流各序分量为:

$$\begin{cases} \Delta I_{M1} = \frac{Z_{T1} + Z_{W1} // Z_{N1}}{Z_{M1} + Z_{T1} + Z_{W1} // Z_{N1}} I_{f1} = C_{M1} I_{f1} \\ I_{M2} = \frac{Z_{T2} + Z_{W2} // Z_{N2}}{Z_{M2} + Z_{T2} + Z_{W2} // Z_{N2}} I_{f2} = C_{M2} I_{f2} \\ I_{M0} = \frac{Z_{T0} + Z_{W0} // Z_{N0}}{Z_{M0} + Z_{T0} + Z_{W0} // Z_{N0}} I_{f0} = C_{M0} I_{f0} \end{cases} \quad (6)$$

其中, C_{M1} 、 C_{M2} 、 C_{M0} 分别为母线 M 侧的正、负、零序电流分配系数。

根据对称分量法可求出发生故障后母线 M 的 A 相电压为:

$$U_{MA} = U_f + [I_{ML} + \Delta I_{M1} + I_{M2} + (1 + 3k) I_{M0}] Z_{Mf1} \quad (7)$$

其中, k 为零序电流补偿系数, $k = (Z_0 - Z_1) / (3Z_1)$, Z_0 为线路单位长度零序阻抗。

M 侧保护实际感受到的 A 相阻抗为:

$$Z_{Mm} = \frac{U_{MA}}{I_{MA} + k \times 3 I_{M0}} \quad (8)$$

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

将式(4)~(7)代入式(8),可求得 M 侧保护的 A 相测量阻抗表达式为:

$$Z_{Mm} = \frac{nL_{MT}Z_1 + \Delta Z = nL_{MT}Z_1 + \frac{3R_f}{(Z_{\Sigma M} + 3R_f)D_d + C_{M1} + C_{M2} + (1 + 3k)C_{M0}} \quad (9)$$

$$D_d = \frac{\frac{1 - \rho_1 e^{-j\delta_1}}{Z_{W1}} + \frac{1 - \rho_2 e^{-j\delta_2}}{Z_{N1}}}{1 + \frac{Z_{M1} + Z_{T1}}{Z_{W1}} \rho_1 e^{-j\delta_1} + \frac{Z_{M1} + Z_{T1}}{Z_{N1}} \rho_2 e^{-j\delta_2}} \quad (10)$$

$$\rho_1 e^{-j\delta_1} = E_W / E_M, \rho_2 e^{-j\delta_2} = E_N / E_M \quad (11)$$

其中, n 为故障位置系数,即母线 M 到故障点的距离占分支线路 MT 全长的百分比; ΔZ 为附加测量阻抗; D_d 为综合系数; ρ_1 、 δ_1 分别为发生故障前 W 侧与 M 侧电源的等效电势幅值比和相位差; ρ_2 、 δ_2 为故障前 N 侧与 M 侧电源的等效电势幅值比和相位差。

线路 NT 上的点 k_2 发生 A 相接地故障时, N 侧保护的 A 相测量阻抗为:

$$Z_{Nm} = Z_{Nf1} + \frac{3R_f}{(Z_{\Sigma N} + 3R_f)D_d + C_{N1} + C_{N2} + (3k + 1)C_{N0}} \quad (12)$$

$$\begin{cases} C_{N1} = \frac{Z_{T1} + Z_{W1} // Z_{M1}}{Z_{N1} + Z_{T1} + Z_{W1} // Z_{M1}} \\ C_{N2} = \frac{Z_{T2} + Z_{W2} // Z_{M2}}{Z_{N2} + Z_{T2} + Z_{W2} // Z_{M2}} \\ C_{N0} = \frac{Z_{T0} + Z_{W0} // Z_{M0}}{Z_{N0} + Z_{T0} + Z_{W0} // Z_{M0}} \\ D_d = \frac{\frac{1 - \rho_1 e^{-j\delta_1}}{Z_{W1}} + \frac{1 - \rho_2 e^{-j\delta_2}}{Z_{N1}}}{1 + \frac{Z_{N1} + Z_{T1}}{Z_{W1}} \rho_1 e^{-j\delta_1} + \frac{Z_{N1} + Z_{T1}}{Z_{M1}} \rho_2 e^{-j\delta_2}} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $\rho_1 e^{-j\delta_1} = E_W / E_N$, $\rho_2 e^{-j\delta_2} = E_M / E_N$, ρ_1 、 δ_1 分别为 W 侧与 N 侧的电源电势幅值比和相位差, ρ_2 、 δ_2 分别为 M 侧与 N 侧的电源电势幅值比和相位差; $Z_{\Sigma N} = Z_{\Sigma N1} + Z_{\Sigma N2} + Z_{\Sigma N0}$ 。

线路 WT 上的点 k_3 发生 A 相接地故障时, W 侧保护的 A 相测量阻抗为:

$$Z_{Wm} = Z_{Wf1} + \frac{3R_f}{(Z_{\Sigma W} + 3R_f)D_d + C_{W1} + C_{W2} + (3k + 1)C_{W0}} \quad (15)$$

$$\begin{cases} C_{W1} = \frac{Z_{T1} + Z_{N1} // Z_{M1}}{Z_{W1} + Z_{T1} + Z_{N1} // Z_{M1}} \\ C_{W2} = \frac{Z_{T2} + Z_{N2} // Z_{M2}}{Z_{W2} + Z_{T2} + Z_{N2} // Z_{M2}} \\ C_{W0} = \frac{Z_{T0} + Z_{N0} // Z_{M0}}{Z_{W0} + Z_{T0} + Z_{N0} // Z_{M0}} \\ D_d = \frac{\frac{1 - \rho_1 e^{-j\delta_1}}{Z_{N1}} + \frac{1 - \rho_2 e^{-j\delta_2}}{Z_{W1}}}{1 + \frac{Z_{W1} + Z_{T1}}{Z_{N1}} \rho_1 e^{-j\delta_1} + \frac{Z_{W1} + Z_{T1}}{Z_{M1}} \rho_2 e^{-j\delta_2}} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $\rho_1 e^{-j\delta_1} = E_N / E_W$, $\rho_2 e^{-j\delta_2} = E_M / E_W$, ρ_1 、 δ_1 分别为 N 侧与 W 侧的电源电势幅值比和相位差, ρ_2 、 δ_2 分别为 M 侧与 W 侧的电源电势幅值比和相位差; $Z_{\Sigma W} = Z_{\Sigma W1} + Z_{\Sigma W2} + Z_{\Sigma W0}$ 。

分析上文推导得到的测量阻抗表达式(9)可知,风电 T 接线路的测量阻抗包含附加测量阻抗

ΔZ , 非金属性故障情况下 $\Delta Z \neq 0$, 导致测量阻抗不再与故障距离成线性正比关系, 即测量阻抗无法正确反映故障距离。进一步分析发现 ΔZ 是由过渡电阻 R_f , 三端电源的电势幅值比 ρ_1, ρ_2 及相位差 δ_1, δ_2 和风电电源等效正序阻抗 Z_{SW1} 、负序阻抗 Z_{SW2} 等参数构成的函数, 其中任何一个参数的变化都将引起 ΔZ 的变化, 继而影响传统距离保护的动作性能, 导致保护拒动或误动。

1.2 节、1.3 节分别从保护范围与测量阻抗的角度分析了风电 T 接后传统距离保护整定方案的适应性, 由分析可知:

a. 风电的 T 型接入使得线路每侧保护的保护方向不唯一, 进而导致保护范围缩小、灵敏度下降;

b. 测量阻抗受过渡电阻、三端电源的电势幅值比和相位差以及风电电源等效序阻抗等参数影响, 无法正确反映故障距离, 可能导致保护拒动或误动。

2 自适应阻抗继电器

由前文分析可知, 距离保护传统整定方案应用于风电 T 接线路时存在两方面的适应性问题, 鉴于此本文分别从保护范围和整定阻抗 2 个角度出发, 提出阻抗继电器的自适应整定方案, 以针对性地解决上述适应性问题。

2.1 阻抗继电器自适应整定方案

a. 保护范围。

保护范围规定为本侧分支线路全长, 即从线路首端到风电接入点 T。结合图 1 及 1.2 节分析知, 此时风电 T 接线路每侧保护仅有唯一的保护方向, 从根本上解决了双保护方向导致保护范围缩小、灵敏度下降的问题。

b. 自适应整定阻抗。

采用 1.3 节推导得到的 M 侧测量阻抗表达式 (9) 作为 M 侧距离保护的自适应整定阻抗, 即:

$$Z_{Mset} = nL_{MT}Z_1 + \frac{3R_f}{(Z_{\Sigma M} + 3R_f)D_d + C_{M1} + C_{M2} + (1 + 3k)C_{M0}} \quad (18)$$

其中, Z_{Mset} 为 M 侧距离保护的自适应整定阻抗。

显然, 不计测量误差, 所提整定方案从根本上保证了整定阻抗与测量阻抗变化的一致性, 即整定阻抗能够自适应地跟踪测量阻抗, 从而 $R_f, \rho_1, \delta_1, \rho_2, \delta_2, Z_{SW1}, Z_{SW2}$ 等参数引起的测量阻抗变化不再影响保护的動作性能。为简化描述, 下文将参数 $R_f, \rho_1, \delta_1, \rho_2, \delta_2, Z_{SW1}, Z_{SW2}$ 统称为关键参数。

为提高距离保护的耐受过渡电阻能力, 保证区内故障的可靠清除, 阻抗继电器应采用曲边四边形特性, 其在阻抗复平面上的自适应动作区域如图 5 所示, 图中, R_{fmax} 为阻抗继电器能够耐受的最大过渡电阻。该动作区域由 4 条临界动作边界曲线组成, 其构造原则如下。

已知参数 $\rho_1, \delta_1, \rho_2, \delta_2, Z_{SW1}, Z_{SW2}$, 按照下述规则分别改变式 (18) 中的过渡电阻 R_f 和故障位置系数 n 。

- 曲线 I: 令 $R_f = 0$ 不变, n 从 0 变化到 1。
- 曲线 II: 令 $n = 1$ 不变, R_f 从 0 变化到 R_{fmax} 。
- 曲线 III: 取 $R_f = R_{fmax}$ 不变, n 从 0 变化到 1。
- 曲线 IV: 取 $n = 0$ 不变, R_f 从 0 变化到 R_{fmax} 。

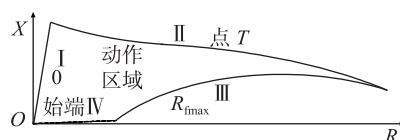


图 5 阻抗继电器的自适应动作区域

Fig.5 Adaptive operating zone of impedance relay

由继电器动作区域的构造原则可知, 保护范围内任一点发生过渡电阻小于 R_{fmax} 的单相接地故障时, M 侧保护的测量阻抗均会落在动作区域内, 即所提自适应阻抗器能够可靠清除区内故障。

2.2 阻抗继电器自适应特性分析

由 2.1 节可知, 整定阻抗公式实为测量阻抗表达式, 故整定阻抗同样是由关键参数构成的函数, 其中任何一个参数变化时, 整定阻抗以及阻抗继电器的动作区域都将随之进行自适应调整。

本节采用控制变量法利用 MATLAB 软件, 编程分析关键参数变化时, 所提阻抗继电器的自适应特性。

a. 最大过渡电阻变化。

给定 $\rho_1 = \rho_2 = 1, \delta_1 = 20^\circ, \delta_2 = 10^\circ, Z_{SW1} = 8.72 + j99.62 \Omega, Z_{SW2} = 5.81 + j66.41 \Omega, R_{fmax}$ 分别为 50Ω 和 100Ω 时, 阻抗继电器的动作区域如图 6 所示。

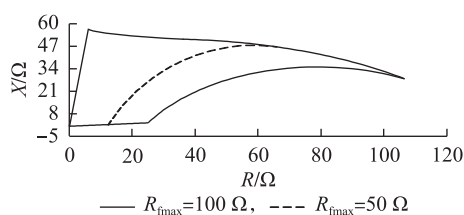


图 6 不同 R_{fmax} 下的阻抗继电器的动作区域

Fig.6 Operating zone of impedance relay under different values of R_{fmax}

从图6中可以看到,阻抗继电器动作区域随 R_{fmax} 的变化进行了自适应调整, R_{fmax} 越大,保护动作区域在阻抗复平面上的覆盖范围越大,保护耐过渡电阻能力越强。在工程应用中,可根据实际需要设计合理的 R_{fmax} 值。

b. 电势幅值比、相位差变化。

给定 $R_{fmax} = 100 \Omega$, $\delta_1 = 20^\circ$, $\rho_2 = 1$, $\delta_2 = 10^\circ$, $Z_{SW1} = 8.72 + j99.62 \Omega$, $Z_{SW2} = 5.81 + j66.41 \Omega$, ρ_1 分别取0.95、1.00和1.05时,阻抗继电器的动作区域见图7(a);给定 $R_{fmax} = 100 \Omega$, $\rho_1 = \rho_2 = 1$, $\delta_2 = 10^\circ$, $Z_{SW1} = 8.72 + j99.62 \Omega$, $Z_{SW2} = 5.81 + j66.41 \Omega$, δ_1 分别取为 1° 和 30° 时,阻抗继电器的动作区域如图7(b)所示。

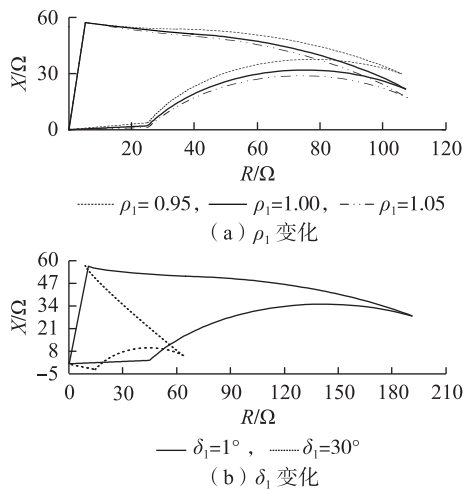


图7 ρ_1 、 δ_1 分别变化时阻抗继电器的动作区域

Fig.7 Operating zone of impedance relay respectively under different values of ρ_1 and δ_1

图7表明,阻抗继电器动作区域能够根据参数 ρ_1 和 δ_1 的变化进行自适应调整。 ρ_2 、 δ_2 变化时保护动作区域的变化与 ρ_1 、 δ_1 变化时的情况类似,不再赘述。

c. 风电电源等效序阻抗变化。

给定 $R_{fmax} = 100 \Omega$, $\rho_1 = \rho_2 = 1$, $\delta_1 = 20^\circ$, $\delta_2 = 10^\circ$, $Z_{SW2} = 5.81 + j66.41 \Omega$, 风电电源等效正序阻抗分别取为 Z_{SW1} 和 $3Z_{SW1}$ 时,阻抗继电器的动作区域如图8所示。由图8可知,继电器动作区域根据参数 Z_{SW1} 的变化进行了自适应调整。

综合前述分析可知,具有曲边四边形特性的阻抗继电器具有自适应特性,其动作区域能够根据关键参数 R_{fmax} 、 ρ_1 、 δ_1 、 ρ_2 、 δ_2 、 Z_{SW1} 、 Z_{SW2} 的变化进行自适应调整,抑制了关键参数变化对阻抗继电器动作性能的影响,弥补了传统距离保护整定方案存在的不足,提高保护的可靠性。

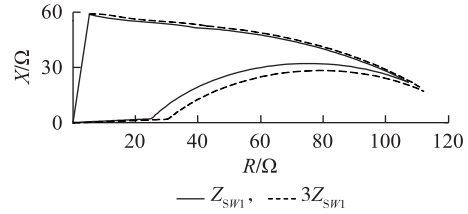


图8 风电电源正序阻抗变化时阻抗继电器的动作区域

Fig.8 Operating zone of impedance relay under different positive sequence impedance of wind power

3 基于自适应阻抗继电器的风电T接线路纵联保护方案

由图1可知,风电T接线路为三端电源系统,其内部任意点发生故障时,三侧保护均应可靠动作切除故障,因此三侧距离保护均应采用2.2节提出的自适应阻抗继电器。

3.1 保护动作逻辑设计

为实现保护瞬时切除风电T接线路全线任意点短路故障的速动功能,设计纵联保护方案的动作逻辑的步骤如下:

- 利用电压互感器和电流互感器采集三侧电压全量、电流全量以及电流零序分量;
- 根据式(8)、(12)、(15)计算三侧测量阻抗 Z_{Mm} 、 Z_{Nm} 、 Z_{Wm} ;
- 根据2.1节绘制三侧自适应阻抗继电器的动作区域;
- 当测量阻抗落在本侧自适应动作区域内时,判断为本侧分支线路故障,本侧保护瞬时动作于跳闸,同时向另外两侧保护发送跳闸信号;
- 当本侧保护收到跳闸信号时,判断为T接线路内部故障,本侧保护瞬时动作于跳闸;
- 当步骤d、e的动作判据均不成立时,判断为T接线路正常运行或外部故障,保护不动作。

所提纵联保护方案的动作原理如图9所示。

由2.1节分析知,要想得到步骤c中自适应阻抗继电器的动作区域,需绘制4条临界动作边界曲线,而边界曲线的绘制,需要首先计算得到相应条件下的自适应整定阻抗,3.2节给出了自适应整定阻抗的计算方法。

3.2 自适应整定阻抗计算

分析式(18)可知,除已知的定值参数外,自适应整定阻抗值取决于关键参数 R_f 、 ρ_1 、 δ_1 、 ρ_2 、 δ_2 、 Z_{SW1} 、 Z_{SW2} 。其中,过渡电阻 R_f 的最大取值反映保护耐受过渡电阻能力,可根据实际工程需要给出;风电电源等效序阻抗 Z_{SW1} 、 Z_{SW2} 可由风场侧的电压、电

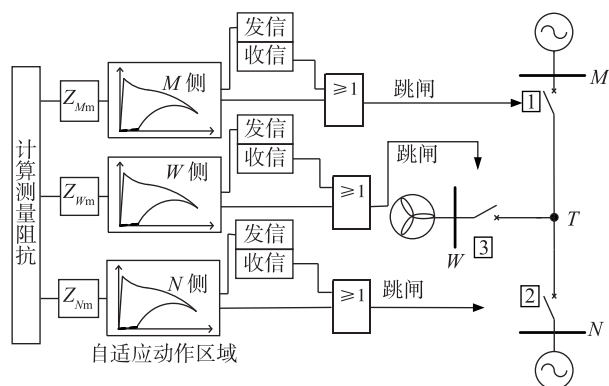


图9 所提纵联保护方案动作原理

Fig.9 Operating principle of proposed pilot protection

流数据根据式(1)、式(2)求出;三端电源电势幅值比 ρ_1 、 ρ_2 和相位差 δ_1 、 δ_2 的计算则对通信系统的要求较高,这是因为由定义式(11)可知, ρ_1 、 δ_1 、 ρ_2 、 δ_2 的计算需要线路三端的电势矢量数据,即T接线路每侧保护均需要与另外两侧进行电势矢量数据的交换。为降低保护对通信系统的要求,本文提出一种仅利用双端数据即可计算参数 ρ_1 、 δ_1 、 ρ_2 、 δ_2 的方法。

根据式(4)及图1可知,T接线路正常运行或发生外部故障时,三端的电压、电流满足:

$$\begin{bmatrix} E_M \\ E_N \\ I_{ML} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -Z_{M1} & -Z_{T1} & -Z_{M1} & -Z_{T1} & -Z_{W1} \\ 1 & & & & & -Z_{W1} \\ 0 & -1 & & & & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_W \\ I_{NL} \\ I_{WL} \end{bmatrix} \quad (19)$$

式(13)包含3个方程6个变量,因此需选定3个变量作为已知量。为充分利用原始通信通道,尽量避免多端间的数据交换,选取M侧量 E_M 、 I_{ML} 以及N侧量 E_N 作为已知量。求解式(19)可得:

$$E_W = E_M \frac{Z_{N1} - Z_{W1}}{Z_{N1}} - E_N \frac{Z_{W1}}{Z_{N1}} - I_{ML} \left[Z_{W1} + \frac{Z_{N1} - Z_{W1}}{Z_{N1}} (Z_{M1} + Z_{T1}) \right] \quad (20)$$

将式(20)代入式(11),得到 ρ_1 、 δ_1 、 ρ_2 、 δ_2 的计算公式:

$$\begin{cases} \rho_1 e^{-j\delta_1} = \frac{Z_{N1} - Z_{W1}}{Z_{N1}} - \rho_2 e^{-j\delta_2} \frac{Z_{W1}}{Z_{N1}} - \frac{I_{ML}}{E_M} \left[Z_{W1} + \frac{Z_{N1} - Z_{W1}}{Z_{N1}} (Z_{M1} + Z_{T1}) \right] \\ \rho_2 e^{-j\delta_2} = E_N / E_M \end{cases} \quad (21)$$

式(21)给出了仅利用M侧和N侧两端数据(I_{ML} 、 E_M 、 E_N)计算参数 ρ_1 、 δ_1 、 ρ_2 、 δ_2 的方法,将三端数据交换问题转化为两端数据交换问题,一定程度上降低了保护对通信系统的要求。

3.3 保护方案对风电系统故障特征的适应性分析

大量文献给出了风电系统故障的普遍特征^[1,2,8,11-12]:弱馈性,等效正、负序阻抗受控时变,含大量高次谐波,频率偏移等。下面重点分析所提保护方案对上述风电系统故障特征的适应性。

(1) 弱馈性(DFIG、PMSG)。

无论是双馈风电场还是直驱风电场亦或混合风电场,在故障过程中其提供短路电流的能力有限,均具有弱馈性。

图1中点 k_3 发生故障时,风电场侧阻抗继电器实际感受到的测量阻抗 Z_{wm} 为:

$$Z_{wm} = Z_k + \left(1 + \frac{I_{Nk} + I_{Mk}}{I_{Wk}} \right) R_f \quad (22)$$

其中, I_{Mk} 、 I_{Nk} 、 I_{Wk} 分别为M、N、W侧的故障电流; Z_k 为保护安装处到故障点的线路阻抗。

分析式(22)可知,由于弱馈性,发生故障时相较于常规电源侧短路电流,风场侧提供的短路电流 I_{Wk} 较小,导致过渡电阻的系数增大,这显然削弱了传统阻抗继电器的耐过渡电阻能力。而本文所提自适应阻抗继电器在整定方案上已计及了过渡电阻的影响,其耐过渡电阻能力可调,故不受风电系统弱馈特性的影响,对风电系统弱馈性具有适应性。

(2) 等效正、负序阻抗受控时变(DFIG、PMSG)。

已知风电场的等效正、负序阻抗与风电机组的类型、运行控制策略、故障穿越策略以及集电系统网络拓扑等因素密切相关。风电场等效正序阻抗的计算公式为^[1]:

$$Z_{W1} = -\frac{\Delta U_{W1}}{\Delta I_{W1}} = Z'_{W1} - \frac{\Delta E_{W1}}{\Delta I_{W1}} \quad (23)$$

其中, ΔE_{W1} 为正序附加电源,其值随机组类型、运行控制策略、故障穿越策略和集电系统拓扑等因素的变化而变化; Z'_{W1} 为风电场自身序阻抗;其他参数含义同式(1)。

事实上由式(18)的自适应整定阻抗公式可知,风电场内部的具体控制策略、网络拓扑参数等并未出现在公式中,而是由风电场等效正、负序阻抗反映。由此可知,风电场等效正、负序阻抗特征是风电机组类型、控制策略、故障穿越策略等因素的集中体现,是其外特性,而以上因素则是风电场等效正负序阻抗的内在表现。因此所提保护方案仅需关注风电场的等效正、负序阻抗外特性,无需关注具体的内部特性。

式(18)表明,风电场等效正、负序阻抗是自适应整定阻抗的因变量之一,即所提保护方案能够根

据风电场等效正、负序阻抗的变化自适应调整保护动作区域,对等效正、负序阻抗的受控时变特性具有适应性。

(3) 含大量高次谐波(DFIG、PMSG)、频率偏移(DFIG)。

分析式(8)、式(18)和图5可知,理论上,若能准确提取保护安装处的工频电压、工频电流相量,则本文所提自适应阻抗继电器原理上不受风电场高次谐波和频率偏移的影响,能够可靠清除故障。

因此相量提取算法的选取将影响线路工频电压、工频电流信息提取的准确度,进而影响保护方案的动作性能。

目前 Prony 算法^[8]和最小二乘矩阵束算法^[18]等可以准确提取保护安装处的电气相量信息,因此基于以上算法,本文保护方案不受高次谐波和频率偏移的影响,对高次谐波和频率偏移具有适应性。

接下来分析在采用常规傅里叶算法提取相量的情况下本文所提保护方案对频率偏移的适应性。不同故障类型下,风电场短路电流中转速频率分量和工频分量的占比不同,傅里叶算法的相量提取误差亦不同。

a. 单相接地故障。

发生单相接地故障时,故障相电流以基频分量为主,衰减转速频率分量很小,其对傅里叶算法的相量提取影响较小^[19],故保护安装处电压、电流相量的提取误差较小,即所提保护方案在发生单相接地故障时具有良好的动作性能。

b. 两相接地故障。

两相接地故障的波形特征类似于单相接地故障,故障相电流的转速频率成分亦较小,傅里叶算法提取相量时的频谱泄漏不明显^[20],因此所提保护方案在发生两相接地故障时具有良好的动作性能。

c. 三相故障。

相较于不对称故障,发生三相故障时风电场内的机组三相均失去额定电压支撑,风电机组提供故障电流的能力很小,而撬棒保护的投入进一步限制了短路电流水平,导致三相短路电流中基频成分很小,转速频率成分则相对较大,导致傅里叶算法的相量提取误差较大,此时所提保护方案的动作性能变差。建议此种情况下采用几乎不受高次谐波和频率偏移影响的时域距离元件^[11]。

上述分析表明,基于傅里叶算法,在发生单相接地故障和两相接地故障时,所提保护方案对风电场的高次谐波和频率偏移仍然具有良好的适应性,而在发生三相金属性故障的极端情况下,所提保护方

案的动作性能将变差,此时可采用时域距离元件。

综上所述,所提保护方案中,风电T接线路每侧的距离保护均采用自适应阻抗继电器,其动作区域能够根据关键参数的变化进行自适应调整,耐受过渡电阻能力亦可调,有效避免了关键参数变化对保护动作性能的影响,对风电系统故障特征具有适应性,弥补了传统距离保护整定方案存在的不足,保证了区内故障的可靠清除;同时,所提自适应整定阻抗计算方法一定程度上降低了保护对通信系统的要求。

4 仿真验证

4.1 系统建模

参照风电场接入系统标准^[17],在PSCAD仿真平台上搭建如图1所示的风电T接系统仿真模型。风电场由10台1.5MW的双馈风电机组构成,转子侧变流器采用基于定子磁链定向的PQ解耦控制,网侧变流器采用基于电网电压定向的矢量控制。系统电压等级为110kV;M侧和N侧电源的等效正、负序阻抗为 $Z_{ISM} = Z_{ISN} = 0.69 + j7.97 \Omega$ 、 $Z_{OSM} = Z_{OSN} = 1.03 + j11.9 \Omega$;线路MT、NT、WT长度均为50km,线路参数为 $Z_1 = 0.036\ 294 + j1.006\ 2 \Omega/\text{km}$ 、 $Z_0 = 0.379\ 58 + j1.327\ 7 \Omega/\text{km}$ 。

4.2 仿真验证

为验证所提风电T接线路纵联保护方案的正确性和有效性,本文针对系统在不同运行状态下M侧发生单相接地短路的情况进行仿真验证。保护实际感受到的阻抗即测量阻抗由式(8)计算得到,自适应整定阻抗根据3.2节所提计算方法求得,自适应阻抗继电器动作区域按照2.1节的构造原则绘制。保护安装处电压相量、电流相量的提取均采用Prony算法。

(1) 自适应整定阻抗计算方法仿真验证。

针对点T发生A相接地短路的情况,按照控制变量法设定4种仿真场景。

a. 场景1: 令 $\rho_1 = \rho_2 = 1$ 、 $\delta_1 = 20^\circ$ 、 $\delta_2 = 10^\circ$ 、 $Z_{SW1} = 8.72 + j99.62 \Omega$ 、 $Z_{SW2} = 5.81 + j66.41 \Omega$ 、 R_f 在0~100 Ω 之间变化。

b. 场景2: 令 $R_f = 100 \Omega$ 、 $\rho_1 = \rho_2 = 1$ 、 $\delta_2 = 10^\circ$ 、 $Z_{SW1} = 8.72 + j99.62 \Omega$ 、 $Z_{SW2} = 5.81 + j66.41 \Omega$ 、 δ_1 在 $1^\circ \sim 30^\circ$ 之间变化。

c. 场景3: 令 $R_f = 100 \Omega$ 、 $\rho_2 = 1$ 、 $\delta_1 = 20^\circ$ 、 $\delta_2 = 10^\circ$ 、 $Z_{SW1} = 8.72 + j99.62 \Omega$ 、 $Z_{SW2} = 5.81 + j66.41 \Omega$ 、 ρ_1 在0.8~1.2之间变化。

d. 场景 4: 令 $R_f = 100 \Omega$, $\rho_1 = \rho_2 = 1$, $\delta_1 = 20^\circ$, $\delta_2 = 10^\circ$, $Z_{SW2} = 5.81 + j66.41 \Omega$, 风电电源等效正序阻抗在 Z_{SW1} 和 $5Z_{SW1}$ 之间变化。

图 10 给出了 4 种场景下, 点 T 发生故障时 M 侧保护的整定阻抗和测量阻抗的电阻分量以及电抗分量, 图 10(d) 中, z 为风电电源等效正序阻抗和 Z_{SW1} 的比值, 如 $z = 5$ 表示风电电源等效正序阻抗为 $5Z_{SW1}$ 。

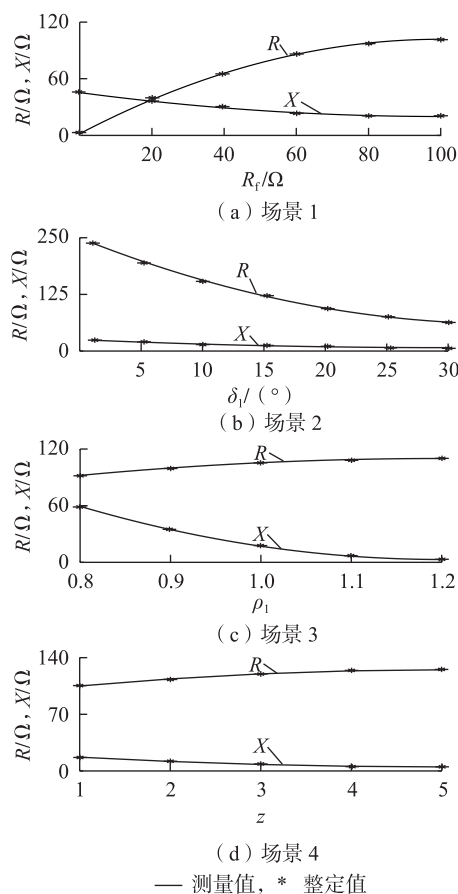


图 10 参数变化时整定阻抗与测量阻抗对比

Fig.10 Comparison between setting and measuring impedances under changing parameter

由图 10 可知, 整定阻抗 (本质为测量阻抗计算值, 见 2.1 节分析) 的电阻、电抗分量与测量阻抗 (仿真值) 的电阻、电抗分量基本一致, 计算值与仿真值误差很小, 说明整定阻抗能够较准确地跟随测量阻抗的变化, 所提自适应整定阻抗计算方法正确。

(2) 保护动作性能仿真验证。

改变参与发电的风电机组数 (等效于改变风电电源等效序阻抗), 假设线路 MT 上 $n = 25\%$ 处发生 A 相接地短路故障, 过渡电阻为 90Ω , 对比分析所提自适应整定方案与传统整定方案下距离保护的动作特性, 仿真结果如图 11 所示。

a. 采用自适应整定方案的距离保护耐受过渡电

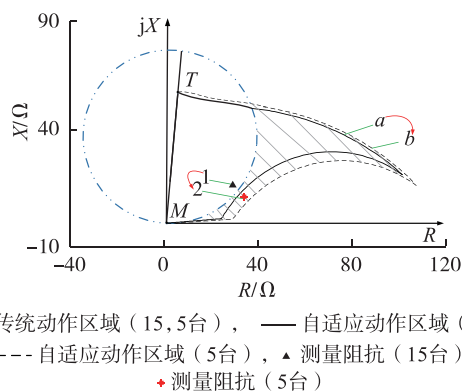


图 11 2 种整定方案下距离保护动作特性对比图

Fig.11 Comparison of operating characteristic between two setting schemes

阻能力由 R_{fmax} 决定, 可以根据工程需要进行设置, 本仿真中取 $R_{fmax} = 100 \Omega$, 由 2.1 节分析知, 理论上保护范围内任意点发生过渡电阻小于 100Ω 的单相接地故障时, 该距离保护均能够将其可靠清除。由图 11 可知, 所述故障场景 ($R_f = 90 \Omega$) 下的测量阻抗确实落在自适应动作区域内, 仿真结果与理论分析一致。

采用传统整定方案的距离保护耐受过渡电阻能力有限, 当风电 T 接线路内部发生故障, 过渡电阻较大时, 测量阻抗落在图 11 中阴影区域, 超出了传统整定方案的保护动作区域, 保护拒动。

b. 分析图 11 可知, 当参与发电的风机组数由 15 台变为 5 台时, 测量阻抗值由位置 1 变化到位置 2, 同时采用自适应整定方案的距离保护动作区域也随之由位置 a 调整到位置 b, 而采用传统整定方案的距离保护动作区域保持不变。进一步分析发现, 风电机组数量变化前, 2 种整定方案下的距离保护均可可靠动作; 但风电机组数变化后, 测量阻抗位置发生变化, 此时由于自适应整定方案下的保护动作区域进行了自适应调整, 保护仍能可靠清除故障, 而传统整定方案下的保护动作区域固定不变, 导致测量阻抗落在动作区域外部, 保护拒动。

上述仿真结果表明, 传统距离保护整定方案在风电 T 接线路中存在适应性问题, 耐过渡电阻能力有限, 保护动作性能受关键参数变化的影响, 可能拒动或误动。而本文所提自适应整定方案使得距离保护能够根据关键参数的变化自适应地调整动作区域, 有效弥补了传统整定方案存在的不足, 且耐过渡电阻能力可调, 有效保证了区内故障的可靠清除。仿真结果验证了理论分析的正确性。

5 结论

本文分析了传统距离保护在风电 T 接线路中的

适应性,提出了基于自适应阻抗继电器的风电T接线路纵联保护方案并给出了自适应整定阻抗的计算方法,主要结论如下。

a. 风电的T型接入使得每侧保护均有2个保护方向,从而导致传统距离保护范围缩小、灵敏度下降;传统距离保护测量阻抗受三端电源电势幅值比、相位差、过渡电阻和风电电源等效序阻抗等参数的影响,无法正确反映故障距离,影响保护的动作性能。因此传统距离保护不再适用于风电T接线路。

b. 所提自适应阻抗继电器能够根据关键参数的变化自适应地调整动作区域,且保护范围唯一,对风电系统故障特征具有适应性,避免了传统距离保护存在的不足;所提风电T接线路纵联保护方案实现了瞬时切除T接线路全线任意点短路故障的速动功能;且自适应整定阻抗的计算仅需两端数据,一定程度上降低了保护对通信系统的要求。

本文仅分析了单相接地故障情况,但分析方法也适用于其他类型的接地故障,限于篇幅,本文不再赘述。

参考文献:

- [1] 王晨清,宋国兵,迟永宁,等. 风电系统故障特征分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(21):52-58.
WANG Chenqing, SONG Guobing, CHI Yongning, et al. Fault characteristics analysis of wind power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 52-58.
- [2] 张保会,王进,李光辉,等. 风力发电机集团式接入电力系统的故障特征分析[J]. 电网技术,2012,36(7):176-183.
ZHANG Baohui, WANG Jin, LI Guanghui, et al. Analysis on fault features of wind turbine generators concentratedly connected to power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 176-183.
- [3] 王晨清,宋国兵,刘凯,等. 突变量保护对风电接入系统的适应性分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(31):5485-5492.
WANG Chenqing, SONG Guobing, LIU Kai, et al. Adaptability analysis of fault component protection of power systems with wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5485-5492.
- [4] 黄涛,陆于平,凌启程,等. 适应于双馈风电场的改进故障序分量选相方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):123-128.
HUANG Tao, LU Yuping, LING Qicheng, et al. Improved fault-sequence component phase selector applied to DFIG-based wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 123-128.
- [5] 张保会,李光辉,王进,等. 风电接入电力系统故障电流的影响参数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.
- [6] 撒奥洋,张哲,尹项根,等. 双馈风力发电系统故障特性及保护方案构建[J]. 电工技术学报,2012,27(4):233-239.
HAN Aoyang, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Research on fault characteristic and grid connecting-point protection scheme for wind power generation with doubly-fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 233-239.
- [7] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2009:90-97.
- [8] 张保会,张金华,原博,等. 风电接入对继电保护的影响(六)——风电场送出线路距离保护影响分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(6):1-6.
ZHANG Baohui, ZHANG Jinhua, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection(6): analysis of distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 1-6.
- [9] 王婷,李凤婷,何世恩. 影响风电场联络线距离保护的因素及解决措施[J]. 电网技术,2014,38(5):1420-1424.
WANG Ting, LI Fengting, HE Shien. Factors impacting distance protection for tie line of wind farm and corresponding countermeasures[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1420-1424.
- [10] PRAHAN A K, JO'OS G. Adaptive distance relay setting for lines connecting wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1):206-213.
- [11] 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.
WANG Chenqing, SONG Guobing, TANG Haiyan, et al. Adaptability analysis of distance protection in power system integration with wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 10-15.
- [12] 黄涛,陆于平,凌启程,等. 撬棒电路对风电场侧联络线距离保护的影响及对策[J]. 电力系统自动化,2013,37(17):30-36.
HUANG Tao, LU Yuping, LING Qicheng, et al. Impact of crowbar on wind farm side interconnection line distance protection and mitigation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 30-36.
- [13] 国家电网公司. 配电网规划设计技术导则:Q/GDW738—2012[S]. 北京:中国电力出版社,2012.
- [14] 刘幸蔚,李永丽,陈晓龙,等. 逆变型分布式电源T接线路后纵联差动保护的改进方案[J]. 电网技术,2016,40(4):1-8.
LIU Xingwei, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. An improved scheme of longitudinal differential protection for teed lines with inverter-based distributed generations[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1-8.
- [15] 陈伟伟,李凤婷,张玉,等. 风电T接双电源系统对距离保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(7):108-114.
CHEN Weiwei, LI Fengting, ZHANG Yu, et al. Impact of wind farm on distance protection for T-connected to the dual power system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 108-114.
- [16] 黄涛,陆于平,蔡超. DFIG等效序突变量阻抗相角特征对故障分量方向元件的影响分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(14):3929-3940.
HUANG Tao, LU Yuping, CAI Chao. Analysis of phase angle characteristics of DFIG equivalent sequence superimposed impedances and its impact on fault components based direction relay[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3929-3940.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 风电场接入电力系统技术规定:GB/T 19963—2011[S]. 北京:中国标准出版社

社,2011.

- [18] 康小宁,屈亚军,焦在滨,等. 基于最小二乘矩阵束算法的工频分量提取方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(21):66-70.
KANG Xiaoning, QU Yajun, JIAO Zaibin, et al. Power-frequency phasor extraction based on least-square matrix pencil algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 66-70.
- [19] 李菁,郑涛,赵裕童,等. 双馈风电短路电流特性对距离保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(6):37-47.
LI Jing, ZHENG Tao, ZHAO Yutong, et al. Impact of doubly-fed wind system short-circuit current characteristics on the transmission line distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 37-47.

作者简介:

郑涛(1975—),男,山东济南人,副教授,博士,研究方



郑涛

向为新能源电力系统保护与控制(E-mail: zhengtao_sf@126.com);

赵裕童(1993—),女,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为新能源电力系统保护与控制(E-mail: yutongzhaohd@ncepu.edu.cn);

陈璨(1988—),女,河北衡水人,博士后,主要从事新能源并网的建模以及分析等方面的研究(E-mail: wsc0621@163.com);

李菁(1989—),女,山东菏泽人,博士研究生,主要从事风力发电及其对继电保护影响方面的研究(E-mail: lijing_ncepu@163.com);

王增平(1964—),男,河北辛集人,教授,博士研究生导师,从事电力系统保护与控制方面的研究(E-mail: wangzp1103@sina.com)。

Pilot protection scheme for power transmission line with T-type wind power connection based on adaptive impedance relay

ZHENG Tao¹, ZHAO Yutong¹, CHEN Can², LI Jing¹, WANG Zengping¹

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Beijing 100045, China)

Abstract: The T-type connection of wind power to the grid has changed the topology and fault characteristic of electric power system, bringing difficulties for relay protection setting and configuration. So there exists an adaptability problem when traditional distance relay is applied to power transmission line with T-type wind power connection. Based on the topology of power transmission line with T-type wind power connection, the influence of double protection direction on the protection range is analyzed. The measuring impedance expression is derived, and the main influencing parameters are extracted. It is pointed out that the T-type connection of wind power will affect the operating performance of distance protection, aiming at which, a pilot protection scheme for power transmission line with T-type wind power connection based on adaptive impedance relay is proposed. It has only one protection direction and its operation zone can be adaptively adjusted according to the variation of transition resistance, the amplitude ratio and phase difference of the three terminal electromotive forces and equivalent sequence impedance of wind power, which improves the reliability and sensitivity of the protection. Meanwhile, a calculation method of the impedance adaptive setting is given, which reduces the requirement of protection for communication system to a certain extent. Simulative results verify the correctness and validity of the proposed protection scheme.

Key words: relay protection; pilot protection; power transmission line with T-type wind power connection; adaptation analysis; measuring impedance; adaptive impedance relay; calculation method