

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.05.027

适用于新能源并网变压器匝间故障识别的新判据

行武, 郭晓, 王哲, 赵施源

(南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211151)

摘要:为增加功率输送能力, 新能源并网变压器采用两电压等级三绕组、接线形式为星角角的变压器。变压器在低压侧发生匝间故障时, 差动保护灵敏度不足, 同时变压器空载合闸于匝间故障时, 涌流闭锁判据会闭锁差动保护, 延长故障切除时间。基于星角角接线型式的新能源并网变压器零序等值回路, 文中通过建立零序节点电压方程, 利用区外故障及匝间故障节点电压方程特征构建匝间故障识别判据, 该判据与差动保护原理相比, 不受励磁涌流的影响, 具有较高的可靠性及速动性。文中利用实时数字仿真系统(RTDS)进行故障仿真, 验证新判据的有效性 & 可靠性, 发现采用新判据能够可靠灵敏地识别变压器匝间故障, 弥补差动保护的不足。

关键词:新能源并网变压器; 匝间故障; 励磁涌流; 实时数字仿真系统(RTDS); 零序等值回路; 差动保护

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2022)05-0219-08

0 引言

为实现“碳中和、碳达峰”的目标, 我国新能源发电进入快速发展期, 新能源发电量迅速攀升。在新能源电站中, 并网变压器为增加输送功率, 常采用两电压等级三绕组变压器。与常规三绕组变压器不同, 该变压器中低压侧为2个绕组, 接线形式为三角型接线, 高压侧为单绕组星型接线。据统计资料显示, 变压器匝间短路占电力系统中大型变压器故障的50%~60%^[1-2]。当变压器低压侧发生匝间故障时, 差动保护灵敏度不足, 同时变压器空载合闸于匝间故障, 故障特征与变压器涌流特征交织, 变压器保护中的涌流闭锁判据会闭锁差动保护, 延长故障的切除时间, 加重变压器绕组损伤, 可能导致严重事故。

在实际工程中, 作为变压器主保护的差动保护采用功率守恒原理, 利用区外故障无差流、区内故障有差流特征对变压器进行故障判别及保护。在变压器低压侧发生匝间故障时, 若差动保护灵敏度不足, 只能等待瓦斯等非电量保护动作, 此外空投于匝间故障时均须等待涌流衰减后才能开放差动保护, 延长故障的切除时间, 导致故障加重^[3-9]。变压器匝间故障一直以来都是变压器保护研究的热点^[10-20], 已有国内外学者对该故障特征进行了深入的研究。文献[21-22]提出的电压差动保护原理及变压器等值回路平衡方程原理解决励磁涌流的影响, 但这些方法在工程应用中存在一定的困难, 变压器在空载合闸时, 无法获取非空投侧的电压,

无法进行判据计算及故障判断, 同时复杂的判据参数需要大量计算、耗费较长时间, 在工程实现上较为困难。

文中首先基于新能源并网变压器绕组结构的特点, 利用零序等值回路, 通过建立零序节点电压方程; 其次, 利用匝间故障与正常运行及区外故障时变压器零序等值回路特征的不同构建匝间故障识别判据。研究发现该判据不受励磁涌流的影响, 区内外故障特征存在明显不同, 具有较高的选择性及灵敏性, 可提高变压器保护在匝间故障时的速动性, 判据简单易于实现, 具有重要的实用价值。此外, 利用电磁暂态实时数字仿真系统(real time digital simulation system, RTDS)进行故障仿真, 验证新判据的有效性 & 可靠性。因此, 利用新判据能够可靠地识别新能源并网变压器的匝间故障, 弥补差动保护的不足。

1 机理分析

1.1 空载合闸及区外故障零序回路分析

1.1.1 空载合闸分析

根据变压器空载合闸的过程建立变压器空载合闸模型, 如图1所示。

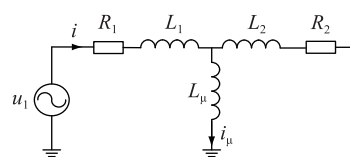


图1 变压器空投等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of energizing no-load transformer

图1中, i 为变压器一次侧电流; i_{μ} 为变压器励磁电流; u_1 为变压器一次侧电压; R_1, R_2 分别为变

收稿日期:2022-05-12;修回日期:2022-07-17

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904900)

压器一次和二次侧电阻; L_1, L_2 分别为一次和二次侧漏感; L_μ 为变压器励磁电感, 由于励磁电阻很小因此忽略励磁电阻的影响。

由图 1 可以列出式(1)方程。

$$\begin{cases} R_1 i + L_1 \frac{di}{dt} + L_\mu \frac{di_\mu}{dt} = u_1 \\ L_\mu \frac{di_\mu}{dt} = \frac{d\Phi}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Φ 为变压器铁芯磁通。

在式(1)中, 为简化方程的求解过程, 取 L_μ 为平均电感 $L_{\mu av}$, 将变系数微分方程转换为常系数微分方程。取 $u_1 = u_{1m} \sin(\omega t + \alpha)$, 其中 α 为合闸时刻电压的相角, ω 为电压角频率, u_{1m} 为电压幅值。由式(1)可求得磁通, 如式(2)所示。

$$\Phi(t) = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + \Phi_m e^{-\frac{t}{T}} \cos \alpha \quad (2)$$

式中: T 为衰减直流分量的衰减时间常数; Φ_m 为磁通幅值。

由式(2)可知, 变压器在空载合闸时, 由于各相电压的合闸角不同, 变压器铁芯中磁通的衰减分量大小不同, 导致变压器各相铁芯的饱和程度不同, 从而使得变压器励磁支路三相电流不再对称, 产生零序电流。该零序源位于励磁支路。

新能源并网 Yn- Δ - Δ 接线变压器空投零序等值回路模型如图 2 所示。

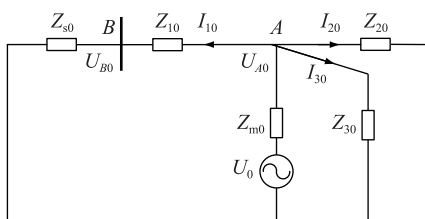


图 2 变压器空投零序等值电路模型

Fig.2 Zero sequence equivalent circuit of energizing no-load transformer

图 2 中, U_{A0} 为 A 点零序电压; U_{B0} 为母线的零序电压; Z_{s0} 为变压器系统侧零序阻抗; Z_{10} 为变压器星型接线侧零序阻抗; Z_{20}, Z_{30} 为变压器三角形接线侧零序阻抗; Z_{m0} 为变压器零序励磁阻抗; U_0 为不平衡零序源的零序电压; I_{10} 为变压器星型接线侧的基波零序电流, 可通过三相电流求和计算得到; I_{20}, I_{30} 为变压器三角形接线侧的基波零序电流, 可通过三角形接线绕组套管电流互感器测量的三相电流求和计算得到。文中电流方向均为实际电流流向。

取零序电流流出变压器的方向为正, 由图 2 可知 A 点的零序电压如式(3)所示。

$$\begin{cases} U_{A0} = I_{20} Z_{20} \\ U_{A0} = I_{30} Z_{30} \\ U_{A0} = U_{B0} + I_{10} Z_{10} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知, 变压器空载合闸时, A 点的零序电压满足的等式与励磁支路无关, 只与变压器的漏抗及流过绕组的零序电流有关。

1.1.2 区外故障分析

文中以变压器区外单相接地故障为例, 故障时变压器零序等值回路模型如图 3 所示。

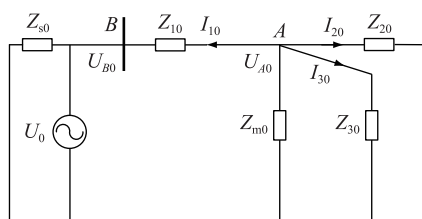


图 3 变压器区外故障零序等值电路模型

Fig.3 Zero-sequence equivalent circuit model of transformer out-of-zone fault

取零序电流流出变压器的方向为正, 取母线 B 的零序电压为 U_{B0} , 由图 3 可知 A 点的零序电压如式(4)所示。

$$\begin{cases} U_{A0} = I_{20} Z_{20} \\ U_{A0} = I_{30} Z_{30} \\ U_{A0} = U_{B0} + I_{10} Z_{10} \end{cases} \quad (4)$$

在变压器空载合闸和变压器区外故障时, A 点的零序电压满足的等式均相同, 且与励磁支路无关, 只与变压器的漏抗及流过绕组的零序电流有关。

1.2 匝间故障分析

以变压器星型接线侧匝间故障为例, 故障时变压器零序等值回路模型如图 4 所示。

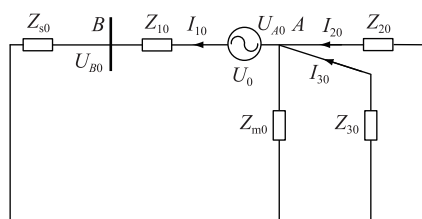


图 4 变压器星侧匝间故障零序等值电路模型

Fig.4 Zero-sequence equivalent circuit model of inter-turn short circuit fault

取零序电流流出变压器的方向为正, 取母线 B 的零序电压为 U_{B0} , 由图 4 可知 A 点的零序电压如式(5)所示。

$$\begin{cases} U_{A0} = -I_{20} Z_{20} \\ U_{A0} = -I_{30} Z_{30} \\ U_{A0} = U_0 - U_{B0} - I_{10} Z_{10} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)可进一步转化为式(6)。

$$\begin{cases} -U_{A0} = I_{20}Z_{20} \\ -U_{A0} = I_{30}Z_{30} \\ -U_{A0} = (U_{B0} + I_{10}Z_{10}) - U_0 \end{cases} \quad (6)$$

变压器三角型接线侧匝间故障与星型侧类似,故障时变压器零序等值回路模型如图5所示。

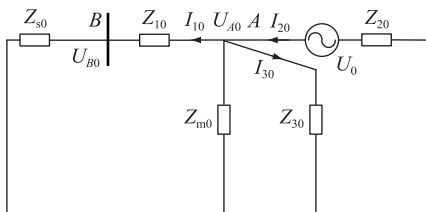


图5 变压器角侧匝间故障零序等值电路模型

Fig.5 Zero-sequence equivalent circuit model of inter-turn short circuit fault

取零序电流流出变压器的方向为正,取母线B的零序电压为 U_{B0} ,由图5可知A点的零序电压如式(7)所示。

$$\begin{cases} U_{A0} = U_0 + I_{20}Z_{20} \\ U_{A0} = I_{30}Z_{30} \\ U_{A0} = U_{B0} + I_{10}Z_{10} \end{cases} \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可知,变压器发生匝间故障时,A点的零序电压与励磁支路无关,但与变压器的漏抗、流过绕组的零序电流及故障零序源的大小有关,同时匝间故障时满足的等式与区外故障及空载合闸时不同。

2 匝间故障识别

2.1 故障识别判据

根据第1章的分析,变压器在空载合闸、发生区外故障及发生匝间故障时,变压器零序等值回路中A点的零序电压满足的等式均与变压器的励磁支路无关,即不会受到变压器励磁涌流的影响。同时,变压器在空载合闸和发生区外故障时A点的零序电压满足的等式与变压器发生匝间故障时A点的零序电压满足的等式均不相同,因此根据此特征提出新能源并网Yn- Δ - Δ 接线变压器匝间故障识别判据,如式(8)所示。即不满足式(8)则判为故障。

$$\begin{cases} U_{B0} + I_{10}Z_{10} - I_{20}Z_{20} = 0 \\ U_{B0} + I_{10}Z_{10} - I_{30}Z_{30} = 0 \\ I_{20}Z_{20} - I_{30}Z_{30} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

零序电流流出变压器的方向为正方向。由于变压器原边及副边绕组电流、电压的采集存在一定的采样误差,因此为增加新判据的可靠性及实用性,新判据引入判定门槛定值,如式(9)所示。

$$\begin{cases} K_1 = \left| \frac{U_{B0} + I_{10}Z_{10}}{I_{20}Z_{20}} - 1 \right| > K_{set} \\ K_2 = \left| \frac{U_{B0} + I_{10}Z_{10}}{I_{30}Z_{30}} - 1 \right| > K_{set} \\ K_3 = \left| \frac{I_{20}Z_{20}}{I_{30}Z_{30}} - 1 \right| > K_{set} \end{cases} \quad (9)$$

式中: K_{set} 为新判据的判定定值。

为保证判据的灵敏性及可靠性,可靠系数可取1.1,所以取 $K_{set} = 1$,其值也可根据工程情况调整,文中暂取0.1进行分析。

2.2 保护逻辑及参数计算

为保证判据的可靠性及灵敏性,保护逻辑采用三取二方式,即式(9)方程组中,有任意2个方程同时满足时,即任意2个值大于设定值时则判为变压器匝间故障,否则不满足判据动作条件,具体保护逻辑如图6所示。

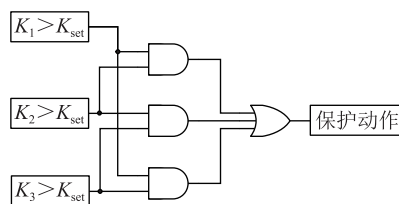


图6 保护逻辑

Fig. 6 Protection logic

新判据是基于不同工况下的零序回路特征提出的,因此在不接地故障或者对称故障无零序电流时,新判据不适用,此时判别逻辑直接判定为无故障。新判据可增强判据运行的可靠性,减小判据非必要的计算,判定流程如图7所示。由于匝间故障多为不对称故障,发生对称匝间的概率极小,因此新判据不予考虑。

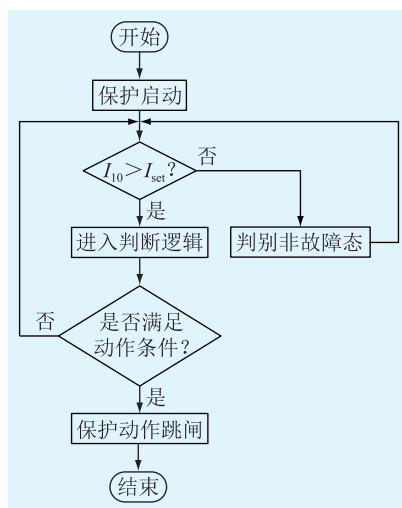


图7 判据判断逻辑流程

Fig.7 Flow chart of protection judgment logic

图7中 I_{set} 为进入判断逻辑的零序电流定值,一般取保护装置的精工电流,可取0.05倍的电流互感器二次值。

根据变压器铭牌中短路电压百分比可计算得到变压器的和绕组正序漏抗值,根据中高压变压器结构,可以取零序阻抗等于正序阻抗,如式(10)所示。

$$\begin{cases} Z_{10} = Z_1 = \frac{U_{k12} + U_{k13} - U_{k23}}{2} \cdot \frac{U^2}{S} \\ Z_{20} = Z_2 = \frac{U_{k12} + U_{k23} - U_{k13}}{2} \cdot \frac{U^2}{S} \\ Z_{30} = Z_3 = \frac{U_{k13} + U_{k23} - U_{k12}}{2} \cdot \frac{U^2}{S} \end{cases} \quad (10)$$

式中: U_{k12} , U_{k13} , U_{k23} 分别为变压器各绕组间的短路电压百分比; U 为变压器额定电压; S 为变压器额定容量。

3 仿真验证

第3章通过RTDS对前述分析和判据进行验证,仿真系统模型示意图如图8。其中系统电源参数为:线电压有效值为220 kV;频率为50 Hz;相角为 0° ;内阻为电阻电感模型。变压器采用匝间短路模型且考虑变压器饱和特性。变压器三绕组额定电压为220 kV/35 kV/35 kV,容量为200 MV·A;频率为50 Hz;绕组W1和绕组W2之间的短路阻抗为0.26 p.u.,绕组W1和绕组W3之间的短路阻抗为0.36 p.u.,绕组W2和绕组W3之间的短路阻抗为0.1 p.u。图8中 F_1 、 F_2 、 F_3 为故障点;PT为电压互感器;CT1、CT2、CT3为电流互感器;QF为断路器。

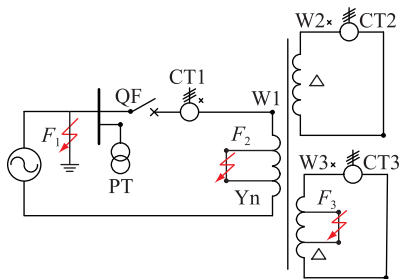


图8 仿真系统

Fig.8 The simulation system

仿真中变压器采用的磁化曲线如图9所示。曲线为工程中变压器的实测电流-电压曲线,趋势与磁化曲线基本一致,可反映变压器铁芯磁化特征,故用以模拟实际情况^[23-25]。

在不同合闸角下对变压器空载合闸进行仿真,并对新判据的可靠性进行验证,新判据在不同合闸角下的动作情况如表1所示。由于合闸角正负半波

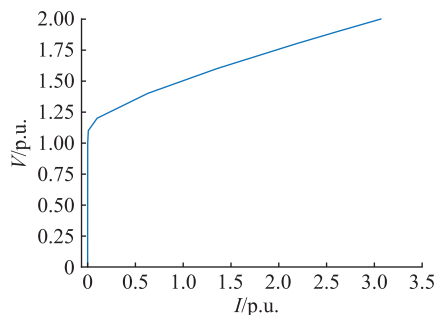


图9 磁化曲线

Fig.9 Magnetization curve

类似,因此仿真中仅列出 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的仿真结果。在表1—表7中,动作结果为新判据不动作的对应 K 值取 $\max(K_1, K_2, K_3)$,而动作结果为新判据动作的对应 K 值取满足图6的 $\min(K_1, K_2, K_3)$ 。

表1 变压器空载合闸仿真结果

Table 1 Simulation results of transformer no-load switching-in

合闸角/ $^\circ$	计算结果	动作结果
0	$K=0.03$	新判据不动作
20	$K=0.02$	新判据不动作
40	$K=0.02$	新判据不动作
60	$K=0.03$	新判据不动作
80	$K=0.02$	新判据不动作
100	$K=0.02$	新判据不动作
120	$K=0.03$	新判据不动作
140	$K=0.02$	新判据不动作
160	$K=0.01$	新判据不动作
180	$K=0.03$	新判据不动作

由表1可知,变压器空载合闸时,在不同合闸角下新判据能可靠判别出当前处于非故障状态,可靠不动作。因此,新判据不受励磁涌流的影响,在变压器空载合闸时不会出现误动。

在不同故障类型下对变压器区外 F_1 点故障进行仿真,并对新判据的可靠性进行验证,新判据在不同故障情况下的动作情况如表2所示。由于不接地故障无零序源,因此仅仿真单相及两相接地故障。

表2 变压器区外接地故障仿真结果

Table 2 Simulation results of earth fault outside the transformer

故障类别	计算结果	动作结果
A相接地故障	$K=0.02$	新判据不动作
B相接地故障	$K=0.02$	新判据不动作
C相接地故障	$K=0.02$	新判据不动作
A、B相接地故障	$K=0.02$	新判据不动作
B、C相接地故障	$K=0.03$	新判据不动作
C、A相接地故障	$K=0.02$	新判据不动作

由表 2 可知,在变压器发生区外故障时,不同类型及相别的接地故障新判据能可靠判别区外故障状态,可靠不动作。因此,新判据不受区外故障的影响,在变压器发生区外故障时不会出现误动。

在不同故障匝数下对变压器匝间故障进行仿真,并对新判据的可靠性进行验证。在不同匝数故障情况下,新判据的动作对比情况如表 3 和表 4 所示,差动定值取 $0.5I_e$, I_e 为变压器额定电流。

表 3 高压侧匝间故障对比仿真结果
Table 3 Simulation results of primary winding inter-turn fault

故障匝数及故障点	计算结果	动作结果
1%- F_2	K 为 0.09	新判据不动作
	差流为 $0.12I_e$	差动保护不动作
2%- F_2	K 为 0.15	新判据动作
	差流为 $0.37I_e$	差动保护不动作
3%- F_2	K 为 0.19	新判据动作
	差流为 $0.83I_e$	差动保护动作
4%- F_2	K 为 0.26	新判据动作
	差流为 $1.29I_e$	差动保护动作
5%- F_2	K 为 0.35	新判据动作
	差流为 $1.71I_e$	差动保护动作

表 4 低压侧匝间故障对比仿真结果
Table 4 Simulation results of secondary winding inter-turn fault

故障匝数及故障点	计算结果	动作结果
1%- F_3	K 为 0.09	新判据不动作
	差流为 $0.01I_e$	差动保护不动作
2%- F_3	K 为 0.16	新判据动作
	差流为 $0.09I_e$	差动保护不动作
3%- F_3	K 为 0.18	新判据动作
	差流为 $0.20I_e$	差动保护不动作
4%- F_3	K 为 0.24	新判据动作
	差流为 $0.31I_e$	差动保护不动作
5%- F_3	K 为 0.34	新判据动作
	差流为 $0.42I_e$	差动保护不动作

由表 3 和表 4 可知,在变压器发生匝间故障时,无论是高压绕组还是低压绕组,当故障匝数大于 1%时,新判据能可靠判别故障状态从而进行动作,而差动保护仅在高压绕组发生较大的匝间故障时才能动作,因此新判据在变压器匝间故障识别上,灵敏性优于差动保护。

在不同合闸角下对不同故障匝数的变压器空投匝间故障进行仿真,并对新判据的可靠性进行验证,新判据在不同合闸角不同故障匝数下的动作对比情况如表 5—表 7 所示。变压器剩磁会对变压器饱和程度有所影响,但不同合闸角下的仿真已模拟

变压器铁芯不同饱和程度对判据的影响,故变压器剩磁影响下的仿真结果与表 5—表 7 中结果类似。差动保护在本次仿真中仅能在高压侧匝间故障时动作,故仅列出高压侧空投匝间故障的仿真结果,差动定值取 $0.5I_e$,二次谐波含量闭锁定值取 0.15。

表 5 0° 空投匝间故障对比仿真结果
Table 5 Simulation results of inter-turn fault for no-load switching-in 0°

故障匝数及故障点	计算结果	动作结果
1%- F_2	K 为 0.09	新判据不动作
	差流为 $1.5I_e$, 二次谐波含量为 0.43	差动保护 不动作
2%- F_2	K 为 0.15	新判据动作
	差流为 $1.8I_e$, 二次谐波含量为 0.34	差动保护 不动作
3%- F_2	K 为 0.19	新判据动作
	差流为 $2.1I_e$, 二次谐波含量为 0.27	差动保护 不动作
4%- F_2	K 为 0.26	新判据动作
	差流为 $2.4I_e$, 二次谐波含量为 0.23	差动保护 不动作
5%- F_2	K 为 0.35	新判据动作
	差流为 $2.8I_e$, 二次谐波含量为 0.18	差动保护 不动作

表 6 45° 空投匝间故障对比仿真结果
Table 6 Simulation results of inter-turn fault for no-load switching-in 45°

故障匝数及故障点	计算结果	动作结果
1%- F_2	K 为 0.09	新判据不动作
	差流为 $1.1I_e$, 二次谐波含量为 0.35	差动保护 不动作
2%- F_2	K 为 0.15	新判据动作
	差流为 $1.5I_e$, 二次谐波含量为 0.31	差动保护 不动作
3%- F_2	K 为 0.19	新判据动作
	差流为 $1.7I_e$, 二次谐波含量为 0.25	差动保护 不动作
4%- F_2	K 为 0.26	新判据动作
	差流为 $2.1I_e$, 二次谐波含量为 0.20	差动保护 不动作
5%- F_2	K 为 0.35	新判据动作
	差流为 $2.4I_e$, 二次谐波含量为 0.14	差动保 护动作

由表 5—表 7 可知,当故障匝数大于 1%时,在不同合闸角空投及变压器发生匝间故障时,新判据能可靠判别故障状态进行可靠动作。新判据不受励磁涌流的影响,在变压器空投于匝间故障时不会出现拒动,能够可靠地识别匝间故障,而差动保护受到励磁涌流的影响无法正确快速动作。

表 7 90°空投匝间故障对比仿真结果
Table 7 Simulation results of inter-turn fault for no-load switching-in 90°

故障匝数及故障点	计算结果	动作结果
1%-F ₂	K 为 0.09	新判据不动作
	差流为 0.13I _e , 二次谐波含量为 0.03	差动保护 不动作
2%-F ₂	K 为 0.15	新判据动作
	差流为 0.4I _e , 二次谐波含量为 0.04	差动保护 不动作
3%-F ₂	K 为 0.19	新判据动作
	差流为 0.8I _e , 二次谐波含量为 0.04	差动保 护动作
4%-F ₂	K 为 0.26	新判据动作
	差流为 1.3I _e , 二次谐波含量为 0.04	差动保 护动作
5%-F ₂	K 为 0.35	新判据动作
	差流为 1.74I _e , 二次谐波含量为 0.03	差动保 护动作

4 结语

文中对已有的新能源并网变压器保护进行分析,指出目前配置保护的不足之处,提出能改善现有保护不足之处的新判据,利用 RTDS 进行建模和故障仿真。

新判据不受励磁涌流及区外故障的影响,在变压器空投于匝间故障时不会出现拒动,能够可靠灵敏地识别出变压器匝间故障,在文中算例中新判据在 2%匝间时能够判别出故障,在空投于匝间时也能可靠动作,灵敏性及可靠性优于差动保护,故新判据具有较高的可靠性及灵敏性。新判据可以弥补差动保护在变压器匝间故障时灵敏度不足的问题,更加完善变压器保护,但新判据还需在工程中进行进一步的验证完善。

参考文献:

[1] 熊小伏,王婧,陈星田. 一种基于电流比变化量的变压器匝间短路保护方法[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(9):112-115.
XIONG Xiaofu, WANG Qiang, CHEN Xingtian. A protection method of transformer inter-turn short circuit based on the variation of current ratio[J]. Power System Protection and Control, 2013,41(9):112-115.

[2] 张立静,盛戈峰,侯慧娟,等. 基于电热特性融合分析的油浸式变压器匝间短路故障辨识方法[J]. 电网技术,2021,45(7):2473-2482.
ZHANG Lijing, SHENG Gehao, HOU Huijuan, et al. Detection method of interturn short-circuit faults in oil-immersed transformers based on fusion analysis of electrothermal characteristic[J]. Power System Technology, 2021, 45(7):2473-2482.

[3] 阿里木江·卡德尔,索南加乐,伊力亚尔·艾尔肯,等. 基于零序电流的超高压自耦变压器相位比较纵联保护的研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(16):59-65.
ALIMJAN Kader, SUONAN Jiale, YILYAR Arken, et al. A novel phase comparison pilot protection scheme based on zero-sequence current of UHV auto-transformer[J]. Power System Protection and Control, 2014,42(16):59-65.

[4] 戎子睿,林湘宁,金能,等. 基于相空间轨迹识别和多判据融合的变压器保护新策略[J]. 中国电机工程学报,2020,40(6):1924-1938.
RONG Zirui, LIN Xiangning, JIN Neng, et al. A new transformer protection scheme based on the recognition of phase space trajectory and multi-criteria fusion[J]. Proceedings of the CSEE, 2020,40(6):1924-1938.

[5] 郭倩雯,莫文雄,郑方晴,等. 高压内置型变压器空投导致零序电流保护误动分析及对策[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(22):164-170.
GUO Qianwen, MO Wenxiong, ZHENG Fangqing, et al. Analysis and measures of zero sequence current protection malfunction caused by no-load high-voltage built-in transformer[J]. Power System Protection and Control, 2018,46(22):164-170.

[6] 唐治平,彭敏放,李光明,等. 基于重复脉冲法的变压器绕组匝间短路故障诊断[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):153-158.
TANG Zhiping, PENG Minfang, LI Guangming, et al. Diagnosis of inter-turn short circuit fault of transformer winding based on repetitive surge oscillograph[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(10):153-158.

[7] 徐剑,华建卫,唐志军. 基于瞬时漏感参数特性识别电流互感器匝间短路故障[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):126-130.
XU Jian, HUA Jianwei, TANG Zhijun. Identification of CT inter-turn short circuit fault based on instantaneous leakage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012,32(11):126-130.

[8] 黄新波,张龙,朱永灿,等. 基于角特性的干式空心电抗器匝间绝缘在线监测技术[J]. 电力自动化设备,2019,39(2):143-148.
HUANG Xinbo, ZHANG Long, ZHU Yongcan, et al. Online inter-turn insulation monitoring technology based on power angle characteristics for dry-type air-core reactor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,39(2):143-148.

[9] 马宏忠,张艳,魏海增,等. 基于转子平均瞬时功率的双馈异步发电机定子绕组匝间短路故障诊断[J]. 电力自动化设备,2018,38(4):151-156.
MA Hongzhong, ZHANG Yan, WEI Haizeng, et al. Diagnosis of stator winding inter-turn short circuit in DFIG based on instantaneous average power in rotor side[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(4):151-156.

[10] 郭倩雯,莫文雄,郑方晴. 一种基于部分 Hausdorff 距离的励磁涌流识别新方法[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(1):35-42.
GUO Qianwen, MO Wenxiong, ZHENG Fangqing. A new me-

- thod of inrush current identification based on partial Hausdorff distance[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1):35-42.
- [11] 黄少锋,李姗姗,肖远清. 基于非周期分量衰减速率的变压器励磁涌流鉴别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15):9-15.
- HUANG Shaofeng, LI Shanshan, XIAO Yuanqing. A novel identification criterion for transformer inrush current based on decay rate of aperiodic component[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15):9-15.
- [12] 陈川江,方春恩,曾俊龙,等. 计及剩磁的空载变压器选相合闸研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16):82-88.
- CHEN Chuanjiang, FANG Chunen, ZENG Junlong, et al. Research on unloaded transformer controlled switching considering residual flux[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16):82-88.
- [13] 叶志军,苟炬龙,蔡金星,等. 变压器一次侧匝间短路参数与特征分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21):213-220.
- YE Zhijun, GOU Julong, CAI Jinxing, et al. Analysis of parameters and characteristics of inter-turn short-circuit fault on primary side of transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21):213-220.
- [14] 陈星宇. 基于最小二乘矩阵束的励磁涌流识别方案[J]. 电力工程技术, 2019, 38(2):44-49.
- CHEN Xingyu. Identification method for inrush current based on least-square matrix pencil algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2):44-49.
- [15] 方文玉. 基于混合智能算法的电力变压器故障诊断研究[J]. 东北电力技术, 2020, 41(1):12-15.
- FANG Wenyu. Research on fault diagnosis of power transformer based on hybrid intelligent algorithm[J]. Northeast Electric Power Technology, 2020, 41(1):12-15.
- [16] 夏家辉,方园,刘卜瑞,等. 基于特征电流波宽判据的变压器差动保护方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1):184-190.
- XIA Jiahui, FANG Yuan, LIU Burui, et al. The transformer differential protection method based on characteristic current waveform width criterion[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1):184-190.
- [17] 李梅,唐菊生. 基于综合制动判据的变压器差动保护研究[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2):135-141.
- LI Mei, TANG Jusheng. Transformer differential protection method based on the comprehensive braking criterion[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2):135-141.
- [18] 焦在滨,马涛,屈亚军,等. 基于励磁电感参数识别的快速变压器保护[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10):1658-1666.
- JIAO Zaibin, MA Tao, QU Yajun, et al. A novel excitation inductance-based power transformer protection scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10):1658-1666.
- [19] 翁汉琰,刘华,林湘宁,等. 基于 Hausdorff 距离算法的变压器差动保护新判据[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2):475-483, 678.
- WENG Hanli, LIU Hua, LIN Xiangning, et al. A novel criterion of the transformer differential protection based on the Hausdorff distance algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2):475-483, 678.
- [20] 胡松,江亚群,黄纯. 基于偏度系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电网技术, 2018, 42(6):1954-1959.
- HU Song, JIANG Yaquin, HUANG Chun. Identification method of transformer inrush current based on skewness coefficient[J]. Power System Technology, 2018, 42(6):1954-1959.
- [21] 王雪,王增平. 变压器电压差动保护方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4):67-72.
- WANG Xue, WANG Zengping. Research on the method of transformer voltage differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4):67-72.
- [22] 李宗博,焦在滨,何安阳. 基于等效磁化曲线智能识别的变压器保护原理[J]. 电工技术学报, 2020, 35(7):1464-1475.
- LI Zongbo, JIAO Zaibin, HE Anyang. Equivalent magnetization curve intelligent recognition based transformer protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7):1464-1475.
- [23] 焦在滨,行武,王钊,等. 变压器励磁涌流负序二次谐波特征及机理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11):146-151.
- JIAO Zaibin, XING Wu, WANG Zhao, et al. Features and mechanism of negative-sequence second harmonics of magnetizing inrush current in transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11):146-151.
- [24] 李宗博,焦在滨,何安阳. 基于卷积神经网络特征迁移策略的变压器智能保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15):5201-5212.
- LI Zongbo, JIAO Zaibin, HE Anyang. Intelligent protection for power transformer using convolutional neural network integrated into features transferring strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15):5201-5212.
- [25] 戎子睿,林湘宁,金能,等. 基于相空间轨迹识别和多判据融合的变压器保护新策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6):1924-1938.
- RONG Zirui, LIN Xiangning, JIN Neng, et al. A new transformer protection scheme based on the recognition of phase space trajectory and multi-criteria fusion[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6):1924-1938.

作者简介:



行武

行武(1988),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护工作(E-mail:wu-xing@sac-china.com);

郭晓(1982),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护工作;

王哲(1990),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护工作。

A new criterion for inter-turn short-circuit fault recognition for new energy grid-connected transformer

XING Wu, GUO Xiao, WANG Zhe, ZHAO Shiyuan

(Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211151, China)

Abstract: In order to increase the transmission capacity of the new energy grid-connected transformer, a two-voltage three-winding transformer with star-angle-angle connection form is adopted. The sensitivity of the differential protection is insufficient when an inter-turn fault occurs on the low-voltage side of the transformer. At the same time, the transformer inrush current blocking criterion blocks the differential protection and extends the fault removal time when the transformer is closed at no-load during the inter-turn fault. Based on the zero-sequence equivalent loop of the new energy grid-connected transformer, the inter-turn fault identification criterion is proposed by using the characteristics of the out-of-area fault and the inter-turn fault. The proposed criterion which is not affected by the magnetizing inrush current has higher reliability and quicker action than the principle of differential protection does. The electromagnetic transient real time simulation system (RTDS) is used to perform fault simulation, which verifies the validity and reliability of the new criterion. Therefore, the new criterion can be used to identify transformer inter-turn faults and make up for the deficiency of differential protection.

Keywords: new energy grid-connected transformer; inter-turn short-circuit fault; magnetizing inrush current; real time simulation system (RTDS); zero-sequence equivalent circuit; differential protection

(编辑 李栋)

(上接第 201 页)

Intelligent forecast of fault risk in active distribution networks considering network reconfiguration

TANG Haiguo¹, ZHANG Di¹, LIU Chengying², REN Lei¹, LI Jiayong²

(1. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Changshang 410007, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changshang 410082, China)

Abstract: After occurrence of natural disasters, active distribution network (ADN) can promptly restore power supply to some critical loads through tie-line switching and flexible distributed generation (DG), and thus the fault risk is effectively mitigated. A data-driven multi-dimensional intelligent forecast approach for the fault risk levels in ADNs is proposed in this paper. Firstly, a feature selection method based on Chi-square test (χ^2) and Pearson correlation coefficients is developed to analyze the strength of fault correlation factors from multiple dimensions and the optimal set of fault features is obtained. Then, an optimal network reconfiguration model is established for the damaged ADNs considering DG integration, and consequently the heterogeneity of the line importance can be taken into account which provides a solid foundation for the classification of fault risks. Furthermore, an intelligent forecast model for ADN fault risk levels is established based on extreme gradient boost (XGBoost) algorithm. Finally, the numerical tests on IEEE RBTS Bus6 distribution network demonstrate that the proposed approach achieves a prediction accuracy 3.17% higher than back propagation (BP) neural network does. The proposed approach has good generalization capability, thus providing an important basis for the fault risk management in ADNs to effectively reduce the fault loss.

Keywords: active distribution network; distributed generation; fault risk; network reconfiguration; data-driven; feature selection

(编辑 李栋)