

自适应电流保护方案的仿真研究

孔凡坊, 吴军基, 叶学勇, 杨伟, 张俊芳

(南京理工大学动力学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 由传统电流保护的整定原则可知, 传统电流保护易受系统运行方式和故障类型的影响, 而自适应电流保护能够克服传统电流保护的缺陷。阐述了自适应电流保护的基本原理, 并对其进行了动作行为分析。利用 ATP-EMTP(电磁暂态仿真程序)仿真 35 kV 电网中的各种短路故障, 对传统式和自适应式电流保护在保护性能上进行了比较, 仿真结果表明, 自适应电流保护较之于传统电流保护具有更好的保护性能。

关键词: 自适应; 故障类型; 运行状态; 保护性能

Research of auto-adaptive current protection simulation

KONG Fan-fang, WU Jun-ji, YE Xue-yong, YANG Wei, ZHANG Jun-fang

(School of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The traditional current protection is easily effected by the running conditions and fault pattern across to its principle, while the auto-adaptive current protection can overcome these defects. The principle of auto-adaptive current protection is described, and the protection performace is analyzed. In use of ATP-EMTP, the faults of 35kV power line is simulated, compared with the traditional type, the simulation results indicate that the auto-adaptive electric current protection surpasses the traditional type in the protection performance.

Key words: auto-adaptive; fault pattern; running conditions; protection performance

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)04-0010-05

0 引言

传统电流保护因其简单、可靠, 在中低压配电系统中得到了广泛的应用, 但由传统电流保护的整定原则可知, 其保护性能易受系统运行状态及故障类型的影响。自适应电流保护能够克服传统电流保护的缺点, 它是一种能够根据电力系统运行状态和故障类型的变化而实时调整保护定值、特性, 从而使保护始终处于最佳性能状态的新型继电保护技术^[1]。利用微机自适应继电保护技术, 可实时监测系统运行状态和快速判定故障类型, 进而自动调整保护的定值, 使其达到最佳保护性能。通过 ATP-EMTP 仿真电网各种短路故障, 提供保护安装处故障前后一个周波的电流、电压数据, 通过 Matlab 编程对数据进行处理从而实现自适应电流保护原理, 然后对传统式和自适应式电流保护进行了保护性能的比较。仿真实验及比较结果表明, 自适应电流保护在保护性能上优于传统式电流保护, 且保护范围稳定, 不受故障类型的影响, 受系统运行状态的影响较小,

是一种很有发展前景的电流保护方案。

1 配电网自适应电流保护原理^[1, 2]

1.1 传统电流速断保护的缺陷

传统电流速断保护是一种有效的辅助性保护, 从保护选择性出发, 电流速断保护的定值应躲过系统最大运行方式下被保护线路末端发生三相短路时流过保护的电流 I_{Fmax} , 可表示为:

$$I_{dz} = K_k I_{Fmax} = \frac{K_k \cdot E}{Z_{smin} + Z_1} \quad (1)$$

由此计算出保护范围为:

$$a = \frac{K_d(Z_{smin} + Z_1) - K_k Z_s}{K_k Z_1} \quad (2)$$

式中: I_{dz} 为保护动作值; E 为保护安装处的等效电势; Z_{smin} 为保护安装处到系统等效电源之间的最小系统阻抗; K_k 为可靠系数; K_d 为故障类型系数; Z_s 为实际系统等效阻抗; a 为电流速断的保护范围。对于式(2), 由于 $K_k > 1$, $K_d \leq 1$, $Z_s > Z_{smin}$, 因此保

护范围将随 K_d 的减小和 Z_s 的增大而缩短,即传统电流速断保护受系统运行方式和故障类型的影响。由此还可以算出保护范围为零的条件:

$$Z_s = \frac{K_d}{K_k} (Z_{min} + Z_1) \quad (3)$$

1.2 自适应电流速断保护原理

为克服传统电流速断保护的上述缺陷,自适应电流速断保护的定值应随系统运行方式和故障类型的实际情况而自动调整,其动作整定值可表示为:

$$I_{dz}' = \frac{K_k \cdot K_d \cdot E}{Z_{sj} + Z_1} \quad (4)$$

要使电流速断保护的定值按式(4)整定,必须快速判定故障类型以确定故障类型系数 K_d 和实时监测系统运行状态即实时计算保护安装处到系统等效电源的系统阻抗 Z_{sj} (Z_{sj} 反应系统运行状态)。

由此计算出自适应电流速断的保护范围:

$$\alpha' = \frac{Z_1 - (K_k - 1)Z_{sj}}{K_k \cdot Z_1} \quad (5)$$

由 α' 可知,此保护方案不受系统故障类型的影响,且总是根据在线实时求得的系统等效阻抗 Z_{sj} 使保护性能处于最佳状态。

将式(2)、(5)比较得 $\alpha' \geq \alpha$ 。由上述分析知自适应速断保护比传统式有更好的保护性能。

1.3 实现自适应电流保护的关键技术

由式(4)、(5)可知,实时监测系统运行状态和快速判定故障类型成为实现自适应电流保护要解决的两个关键问题。

实时监测系统的运行状态就是在故障发生后,应能快速计算出被保护线路的系统等效阻抗,可利用故障分量原理计算系统等效阻抗^[3]。由叠加原理可知,故障状态=正常运行状态+故障附加状态,其中故障信息蕴含在故障附加状态中。

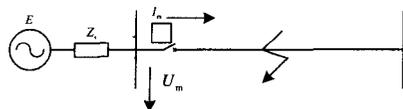


图1 故障状态

Fig.1 The fault state

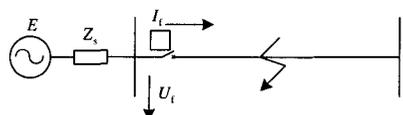


图2 正常运行状态

Fig.2 The good running state

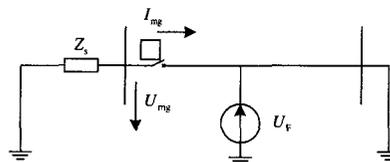


图3 故障附加状态

Fig.3 The fault added state

故障信息=故障后实测信息-故障前实测信息,即:

$$\begin{cases} U_{mg} = U_m - U_f \\ I_{mg} = I_m - I_f \end{cases} \quad (6)$$

根据故障信息可以求出系统等效阻抗,即:

$$Z_{sj} = Z_{sj}(1) = -\frac{U_{mg}(1)}{I_{mg}(1)} \quad (7)$$

对于不对称性故障可用正序网络得到故障附加状态,故式(7)统一表示成正序参数形式。然后由故障状态求出系统等效电势,即:

$$E = U_m + Z_{sj} \cdot I_m \quad (8)$$

另一个关键问题就是当微机保护装置检测出故障后应快速判定故障类型。目前已有很多故障判别算法。文献[5]提出了相电流差突变量选相算法,是目前广泛应用的一种故障选相方法;文献[6]还提出了基于模量的选相原理。本文在进行故障判别时采用相电流差突变量选相算法。

2 自适应电流保护的動作特性分析

自适应速断保护测量元件的动作表达式为:

$$I_d \geq I_{dz}' = \frac{K_k K_d \cdot E}{Z_{sj} + Z_1} \quad (9)$$

图4是一35 kV不接地或小电流接地系统,以开环方式运行的单端辐射网络,现以装设在线路L上m端的自适应电流速断保护为例进行分析。假设系统在不同地点F1、F2处发生短路故障。

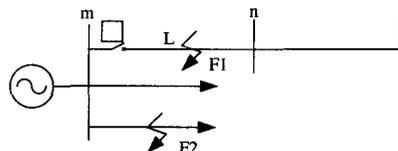


图4 系统在不同线路上的故障

Fig.4 The fault in the different lines

2.1 被保护线路正方向发生短路故障

反映在图4中就是F1点发生故障,由故障分量原理得到F1点系统的故障附加状态^[1],此时的故障

附加状态网络图与图 3 是一样的, 这里不再赘述。如图 3 母线 m 处系统等效阻抗为

$$Z_{sj} = -\frac{U_{mg}}{I_{mg}} = \frac{I_{mg}Z_1}{I_{mg}} = Z_1 \quad (10)$$

式中: U_{mg} 、 I_{mg} 为保护 1 处电压、电流故障分量, 通过实时计算出来的 Z_{sj} 能够正确反映系统阻抗, 因此被保护线路正方向故障且发生在保护区内时自适应电流速断保护能可靠动作, 否则不动作。

2.2 相邻线路故障时被保护线路带有负载

反映在图 4 中就是 F2 点发生故障, 假设在 F2 处发生三相短路故障, 对应故障附加状态如图 5 所示, 由式 (7) 通过实时计算出的系统阻抗 (但该值并不正确反映系统的真实等效阻抗值) 为

$$Z_{sj} = -\frac{U_{mg}}{I_{mg}} = -\frac{I_{mg}(Z_1 + Z_2)}{I_{mg}} = -(Z_1 + Z_2) \quad (11)$$

自适应电流保护的定值为:

$$I_{dz} = \left| \frac{K_k E}{Z_{sj} + Z_1} \right| = \left| \frac{K_k E}{-Z_2} \right| \quad (12)$$

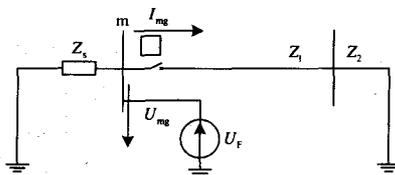


图 5 F2 点故障附加状态
Fig.5 The fault added state of F2 point

当 Z_2 为无源负载时, 显然线路电流为 $I_d = 0$, $I_d \leq I_{dz}$, 保护可靠不动作; 当 Z_2 为有源负载时, 例如电动机负载, 设负载侧的电势为 E_h , 则线路短路电流为 $I_d = \frac{E_h}{Z_1 + Z_2}$, 仍满足 $I_d \leq I_{dz}$, 保护可靠不动作。

由上述分析可知, 被保护线路区内故障时, 根据式 (7) 能正确计算出系统的等效阻抗 Z_{sj} , 保护可靠动作; 相邻线路故障被保护线路正常运行时, 虽然计算的系统阻抗 Z_{sj} 不能正确反映除被保护线路之外的实际系统阻抗 Z_s , 但依据式 (4) 进行整定计算保护不会误动作, 具有可靠的动作特性。

3 基于 ATP-EMTP 的数字仿真

为验证自适应电流速断保护方案的正确性, 使用 ATP-EMTP 软件对下述单端配电线路进行数字仿真。利用 ATP 提供的与 Matlab 相交互的接口程序将 ATP 仿真后的数据传送给 Matlab, 然后利用 Matlab

编程对数据进行处理, 包括提取故障信息、由公式 (4)、(5) 计算自适应速断的保护定值及保护范围。

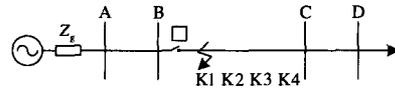


图 6 35 kV 配电线路
Fig.6 The distribution line of 35 kV

BC 线路长度为 20 km, 其中 K1、K2、K3、K4 点分别为距 B 母线 5 km、8 km、12 km、16 km 的位置。用 ATPDRAW 软件画出的电路模型为:

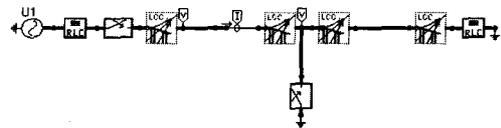


图 7 ATPDRAW 中的电路模型
Fig.7 The circuit modal in ATPDRAW

3.1 各种短路故障时的仿真波形

1) 单相接地短路

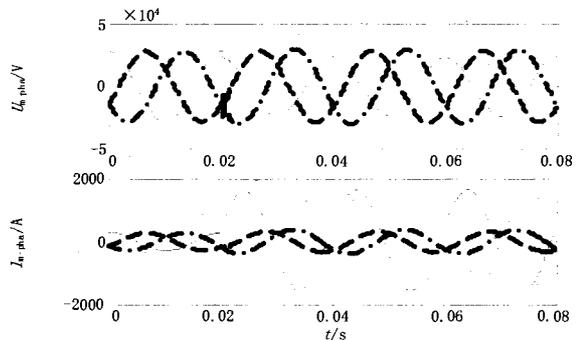


图 8 故障后电压电流波形
Fig.8 The voltage and current waveform of fault

2) 三相短路

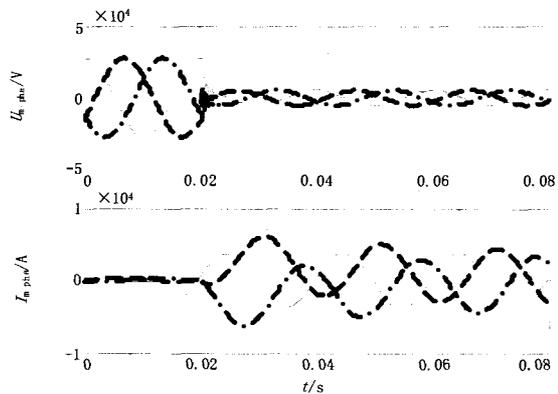


图 9 故障后电压电流波形
Fig.9 The voltage and current waveform of fault

3) 两相短路

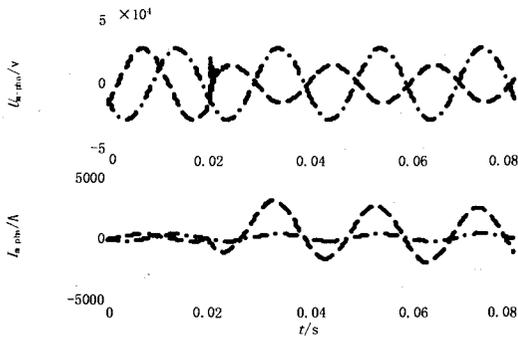


图 10 故障后电压电流波形

Fig.10 The voltage and current waveform of fault

说明: 上述各种故障均是在 0.02 s 发生, 且为永久性故障, 仿真时间为 0.08 s。

3.2 仿真数据分析

针对仿真后的三相短路和两相短路进行数据分析。设电源内阻抗为 $Z_G=0.2+1.57j$ 时, 为系统最大运行方式; $Z_G=0.6+4.71j$ 为系统的最小运行方式, 分别在 k1、k2、k3、k4 点分别进行故障仿真。通过故障检测与判别程序记录保护安装处的相电压、相电流采样数据, 然后利用公式(3)、(4), 编写 Matlab 计算程序, 提取故障信息, 进而实现自适应电流速断保护原理。

表 1 最大运行方式下三相短路传统式和自适应式性能比较

Tab.1 The performance comparison between traditional protection and auto-adaptive protection in the maximal running pattern for three-phase fault

	k1	k2	k3	k4
Z_s	0.38+3.13j	0.38+3.14j	0.37+3.11j	0.39+3.16j
I_d	4524	3793	3123	2658
I_{dz}	2778	2778	2778	2778
I_{dz}'	2778	2778	2778	2775
a	74%	74%	74%	74%
a'	74%	74%	74%	73.8%

表 2 最大运行方式下两相短路传统式和自适应式性能比较

Tab.2 The performance comparison between traditional protection and auto-adaptive protection in the maximal running pattern for two-phase fault

	k1	k2	k3	k4
Z_s	0.35+2.93j	0.39+2.97j	0.37+2.95j	0.38+2.96j
I_d	4003	3373	2600	2390
I_{dz}	2778	2778	2778	2778
I_{dz}'	2409	2405	2407	2406
a	57.3%	57.3%	57.3%	57.3%
a'	74.4%	73.8%	74.1%	74%

由表 1 可得出: 在系统最大运行方式下发生三相短路, 传统式和自适应式有相同的保护范围和保护性能。这是由于此时 $Z_s = Z_{smin}$, 与理论分析相一致。

由表 2 可得出: 最小运行方式下传统式保护相应的保护范围明显变小; 自适应速断的因其动作值始终小于传统式的动作值, 故自适应式有较大的保护范围。

表 3 最小运行方式下三相短路传统式和自适应式保护性能比较

Tab.3 The performance comparison between traditional protection and auto-adaptive protection in the minimal running pattern for three-phase fault

	k1	k2	k3	k4
Z_s	0.93+6.18j	0.95+5.97j	0.94+5.93j	0.92+5.91j
I_d	2627	2363	2090	1871
I_{dz}	2778	2778	2778	2778
I_{dz}'	2029	2025	2021	2017
a	17.2%	17.2%	17.2%	17.2%
a'	64.9%	65.1%	66.2%	66.7%

由表 3 可得出: 在此故障运行状态下传统式保护具有很小的保护范围; 而自适应速断保护仍能适应此故障运行状态, 具有较大的保护范围。因此系统在较小运行方式下自适应速断保护仍具有更高的保护性能。

表 4 最小运行方式下两相短路传统式和自适应式性能比较

Tab.2 The performance comparison between traditional protection and auto-adaptive protection in the minimal running pattern for two-phase fault

	k1	k2	k3	k4
Z_s	0.96+6.13j	0.88+5.95j	0.95+5.91j	0.93+6.12j
I_d	2362	2134	1895	1557
I_{dz}	2778	2778	2778	2778
I_{dz}'	1748	1754	1762	1750
a	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%
a'	64.9%	65.5%	66.2%	65.2%

由表 4 可得出: 系统最小运行方式发生两相短路时, 传统式电流保护将处于保护性能最差的状态下, 其保护范围很小, K1 点以后的线路已经在保护范围以外; 而自适应式仍然有较大的保护范围, 从而提高了保护的可靠性, 在此故障运行状态下明显显示了自适应式电流速断的优势。

将 k1 点在最大、最小运行方式下分别发生三相短路及两相短路时传统式和自适应式速断保护作一下比较。

从表5通过比较可以看出:

由于传统电流速断保护的的动作值是离线事先

整定的, 故恒定不变; 而自适应速断的动作值是在线计算的, 随系统运行方式和故障类型的变化而自动调整。传统速断保护的保护区很不稳定, 受系统运行方式和故障类型的影响比较严重; 而自适应电流速断保护的保护区不论在何种运行方式下, 均优于传统电流速断保护, 且不受故障类型的影响。

表 5 自适应式和传统式速断保护的比较

Tab.5 The performance comparison between traditional protection and auto-adaptive protection

	三相短路		两相短路	
	最大运行方式	最小运行方式	最大运行方式	最小运行方式
Z_s	0.35+2.93j	0.93+6.18j	0.35+2.93j	0.96+6.13j
I_d	4524	2627	4003	2362
I_{dz}	2778	2778	2778	2778
I_{dz}'	2778	2029	2409	1748
α	74%	17.2%	57.3%	4.8%
α'	74%	64.9%	74.4%	64.9%

4 结论

本文通过ATP及Matlab仿真, 总结出自适应电流速断保护具有以下特点:

1) 自适应电流保护通过实时监测系统运行方式和故障类型, 进行在线整定计算。因此自适应电流保护受系统运行方式的影响较小, 且不受故障类型的影响, 能够适应系统运行工况, 从而使保护始终处于最佳的运行状态。

2) 自适应电流保护克服了传统电流保护受系统运行方式和故障类型的影响这一缺陷, 因此有更高的可靠性, 具有较高的理论价值和应用价值。

3) 提高了继电保护的选择性、灵敏性, 实现了保护性能最佳化、整定计算在线化。自适应电流保护对于优化电网的运行方式, 保护电网的安全、优质、经济运行以及变电站的综合自动化等提供了技术支持。

4) 鉴于人工智能技术在继电保护领域中的迅速发展, 也可以将其应用到自适应继电保护中, 从而为继电保护提供更加反映系统运行工况的自适应控制策略, 这也是自适应继电保护技术发展的新方向。

另外, 本文在仿真实验中利用 ATP 和 Matlab 之间的接口, 实现了 ATP 和 Matlab 的交互, 从而发挥了各自的优势, 提高了仿真实验的效率。

参考文献

[1] 罗庚廉. 继电保护及自动化新原理、新技术研究及应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.

- [2] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [3] 冯巧玲, 冯建勤. 自适应电流速断保护分析[J]. 郑州工业学院报(自然科学版) 2005, 10(3): 12-14.
FENG Qiao-ling, FENG Jian-qin. Analysis of Rapid Current Protection[J]. Zhengzhou Institute of Technology, 2005.
- [4] 李红岩, 王安定, 张保会. 一种新的故障检测和故障选相方法[J]. 继电器, 1997, 25(2): 11-14.
LI Hong-yan, WANG An-ding, ZHANG Bao-hui. A New Method of Fault-Detection and Phase-Select for Fault[J]. Relay, 1997, 25(2): 11-14.
- [5] 葛耀中. 自适应继电保护及其发展前景展望[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(9): 42-46.
GE Yao-zhong. Auto-adapted Relay Protection and Its Prospect of Development[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(9): 42-46.
- [6] 徐晓慈. 架空—电缆混合线路的自适应保护方案[J]. 华东电力, 2005, 9(4): 14-18.
XU Xiao-ci. Auto-adapted Protection Plan for Overhead-cable Mixed Lines[J]. East China Electric Power, 2005, 9(4): 14-18.
- [7] 索南加乐, 张健康, 宋国兵. 不同故障下具有相同灵敏度的配电网自适应电流保护[J]. 西安交通大学报, 2005, 5(2): 9-13.
SUONAN Jia-le, ZHANG Jian-kang, SONG Guo-bing. Adaptive Current Protection with Sensitivity Independent of Different Type of Faults[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 5(2): 9-13.
- [8] 吴强, 袁兆强. 自适应继电保护的整定方法[J]. 江西电力, 2006, 30(5): 10-12.
WU Qiang, YUAN Zao-qiang. Setting Method of Self-adaptive Relay Protection[J]. Jiangxi Electric Power, 2006, 30(5): 10-12.
- [9] HA Heng-xu, ZHANG Bao-hui. Study on Reactance Relays for Single Phase to Earth Fault on EHV Transmission Lines[A]. In: 2004 International Conference on Power System Technology, Power Con[C]. 2004. 1-5.
- [10] Li K K. An Adaptive Window Length Algorithm for Accurate High Speed Digital Distant Protection[J]. The International Journal of Power & Energy Systems, 1997, 19(6): 375-383.

收稿日期: 2007-07-19; 修回日期: 2007-08-21

作者简介:

孔凡坊(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; Email: kongfanfang2002@126.com

吴军基(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统及其自动化、电力市场等方面的教学与研究工作;

叶学勇(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为数据挖掘在电力系统中的应用。