

基于短路早期检测的中压故障电流快速限制技术

缪希仁, 李 飙, 吴晓梅, 鲍光海, 吴守龙

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 为了提高故障电流限制器(FCL)在中压系统中的性能,提出基于短路电流早期检测的故障限流技术。在建立中压配电短路故障仿真模型的基础上,提出利用 Mallat 多尺度分辨小波变换实现短路电流早期检测。以中压动态模拟系统为对象,验证了中压短路电流早期检测的有效性。以串联谐振型 FCL 为例,分析对比了基于常规短路判据与早期检测的故障限流效果;以断路器分断苛刻度为指标,分析早期短路检测对故障分断能力的影响。仿真分析表明,基于短路电流早期检测的故障限流技术性能良好。

关键词: 中压系统; 配电; 短路电流; 小波变换; 故障检测; 早期检测; 故障电流限制器; 分断苛刻度

中图分类号: TM 713

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.11.012

0 引言

随着中压配电系统负荷的迅速增长以及大容量机组不断投入运行,中压电网的短路电流不断增大^[1-2]。不断增大的短路电流导致经常发生因变压器近区出口短路而造成的主变压器绕组变形等故障,使变压器处于亚健康运行状态,给电网安全运行埋下很大隐患。此外,近年来发电厂装机容量及其配电容量增大,大型发电机出口及厂高变出口的短路电流迅速提高。较大的短路电流对线路、设备及开关本身的动热稳定性提出了更高要求^[3]。然而,无限度地提高断路器或熔断器的开断能力及线路、设备的动热稳定性是很不经济甚至是不可能的,并且断路器的极限分断次数十分有限。

为了限制短路电流,一般可从调整电网结构、改变系统运行方式和加装限流设备三方面加以考虑^[4]。然而调整电网结构代价昂贵,改变系统运行方式又容易造成电力系统运行的不稳定。文献^[5-7]指出在当前的中压配电系统中,装设限流电抗器或限流熔断器仍然是目前应用较广的限流措施。然而,由于限流熔断器的开断能力非常有限,其只能用在电压等级较低场合^[5];而在设备端加装电抗器则会导致网络损耗增加并降低系统的稳定性^[8]。作为限制短路电流的一种措施,装设短路电流限制器 FCL(Fault Current Limiter)是一种有效的技术措施。

目前,无论是传统的还是智能型的短路保护电器,大多仍采用全电流值是否大于整定值作为短路故障的判据。若用此判据判断短路故障,由于非周期分

量的存在,短路电流一般会在第 1 个周期内达到电流峰值,此时短路已经发生了 5~10 ms^[7]的时间,断路器需开断数倍甚至数十倍于额定值的短路电流。

随着微电子技术、计算机技术、传感技术以及现代数学理论的发展,对短路故障进行早期检测和有效保护已成为可能。通过有效实现故障早期检测辨识,尽早实现 FCL 在故障初期投入,可大幅度提高短路保护电器分断能力及 FCL 的限流性能,减轻短路电流对电力系统及其电气设备造成的威胁,对线路、设备及开关本身动热稳定性的要求也相应降低^[9]。

文献^[10-12]指出小波变换具有较强的消除白噪声能力,且对随机脉冲干扰也有一定抑制作用。综合小波去噪与短路故障奇异性辨识能力,文献^[11-12]采用第 4 尺度细节分量作为低压短路故障早期检测的故障特征量,可在故障后 200 μ s 对大部分相角实现短路早期检测特征量提取,采用 TMS320F2812 数字信号处理器(DSP)进行滤波与短路故障辨识,运算时间仅为 20.75 μ s,即可在 300 μ s 内实现低压短路故障早期检测与辨识。

本文将短路故障早期检测方法引入中压系统,在动态模拟系统实验室验证短路故障早期检测有效性基础上,以串联谐振型 FCL 为模型,提出短路故障早期检测的 FCL 快速限流技术,为智能配电网的控制与保护提供了新的思路和方法。此外,本文分析了 FCL 在短路故障早期的快速限流效果,并引入断路器分断苛刻度指标,评估短路故障的早期快速 FCL 技术对断路器分断能力的影响,仿真结果表明,其在全相角范围内对短路电流抑制与降低断路器对短路电流分断能力的要求方面具有显著效果。

1 可控串联谐振型 FCL 工作原理

近年来,国内外在 FCL 的研制方面取得了许多成果,其中超导型、电力电子型和基于常规设备的经济

收稿日期:2014-05-27;修回日期:2014-09-25

专利:中华人民共和国发明专利(201410082233.0)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377023);福建省科技厅重大项目(2011H6013)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51377023) and Key Program of Fujian Provincial Department of Science & Technology(2011H6013)

型 FCL 成为研究与应用热点。文献[13-14]提出的超导型 FCL 具有响应速度快、自触发等特性,但由于现阶段技术可靠性以及成本等条件限制,超导型 FCL 暂不加以讨论。电力电子型 FCL 又称柔性化的短路电流限制器 FSCL(Flexible Short Current Limiter),它已开始应用于配电网。FSCL 是用半导体器件替代传统的开关设备以达到限流阻抗的快速切换,从而限制短路电流,其主要实现方案为固态 FCL、功率电子器件的可控 FCL 以及具有可控串联补偿的 FCL^[15-16]。从技术可行性与经济性考虑,基于常规电气设备或元件的经济型 FCL,无疑是解决故障限流问题的首选。其中,基于常规电气元件的串联谐振型 FCL,不仅可将短路电流限制到较低水平,而且具有运行可靠性高、价格低廉和技术经济性能好等明显优点,能克服现有限流技术的不足,但存在不可控的特点^[17]。

本文将利用短路早期检测判据实现 FCL 快速投切控制,因此所选的 FCL 模型为电力电子型与经济型 FCL 相结合,即固态可控串联谐振型 FCL,如图 1 所示。图中,FCL 主要由电容 C 、旁路电感 L_1 、串联电感 L_2 、可关断晶闸管 GTO(Gate Turn-Off thyristor)和保护用的避雷器 A_{ZnO} 组成。

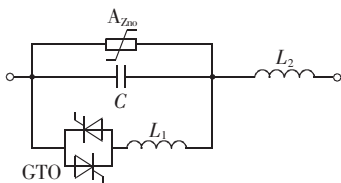


图 1 串联谐振型 FCL 拓扑

Fig.1 Topology of series resonant FCL

正常情况下,GTO 截止,负荷电流从电容器流过,由于容抗与串联电感 L_2 的感抗相同,所以此时二者处于串联谐振状态,对系统运行无影响;短路故障时,控制 GTO 导通,旁路电感 L_1 接入。 L_1 与 C 选择适当的参数,并联后可以得到较大的电抗,与 L_2 串联后共同限流,并且可根据不同的短路情况,即短路电流大小调节 GTO 的导通角,以改变限流程度^[18]。

2 中压短路故障早期检测原理及其验证

2.1 小波变换原理

小波变换是时间(空间)频率的局部化分析,通过伸缩平移运算对信号逐步进行多尺度细化,最终达到高频处时间细分、低频处频率细分,自动适应时频信号分析的要求,从而可聚焦到信号的任意细节,解决傅里叶变换纯频域分析的限制性^[19]。

Mallat 算法将信号在不同时间和不同频率尺度上进行分解,提取信号在各个尺度上所体现的特征,其小波分解的快速递推公式为:

$$S_{2^j}f(n) = \sum_k h_k S_{2^{j-1}}f(n-2^{j-1}k) \quad k = -1, 0, 1, 2$$

$$W_{2^j}f(n) = \sum_k g_k S_{2^{j-1}}f(n-2^{j-1}k) \quad k = 0, 1 \quad (1)$$

其中, S_{2^j} 、 W_{2^j} 分别为源信号 $S_{2^j}f$ 通过低通滤波器与高通滤波器得到的光滑分量以及细节分量。

本文以三次 B 样条函数的导函数为小波函数,其低通及带通滤波器的脉冲响应系数为: $g_0 = -2, g_1 = 2; h_{-1} = h_2 = 0.125, h_0 = h_1 = 0.375$ ^[12]。

由式(1)可知,在对信号实施小波分解时,其小波分量在各尺度下的计算值均用到上一尺度的平滑分量,且每一尺度下的小波分量与上一尺度的平滑分量的差分成正比,即小波分量值体现了信号不断被平滑后的导数值。因此,它既能体现信号变化率的大小,又剔除了噪声干扰的影响。考虑到前 4 阶小波分量的滤波作用及电力系统故障信号奇异性的特点^[11,20],本文将第 4 尺度分量应用于中压系统短路故障检测。

2.2 中压短路故障早期检测及其动模实验验证

2.2.1 基于小波的中压短路故障早期检测机理

图 2 所示为动模实验室一次接线图,其主要工作原理是利用升压变压器 T_{01} 、 T_{21} 将市电 380 V 升压至 800 V,模拟中压系统电压等级及其线路参数。图 2 中,主要一次设备参数: G_{01} 的额定功率为 12 kW,额定电压为 380 V,功率因数为 0.8; G_{02} 的额定视在功率为 5 kV·A,瞬变电流衰减时间常数 T_d 为 1.88 s,额定转速为 1500 r/min; T_{01} 采用 Y/Δ-11 接线形式,额定容量为 15 kV·A,短路电压为 13%,变比为 380 V/800 V; T_{21} 采用 Y/Δ-11 接线,额定容量为 50 kV·A,短路电压为 13%,变比为 380 V/800 V; $X_{L31} = X_{L32} = 3X, X_{L11} = 2X, X$ 为线路阻抗, X 的参数为 $x_1 = 7.79 \Omega, r_1 = 0.709 \Omega$ 、阻抗角 $\psi = 84.8^\circ$ 。

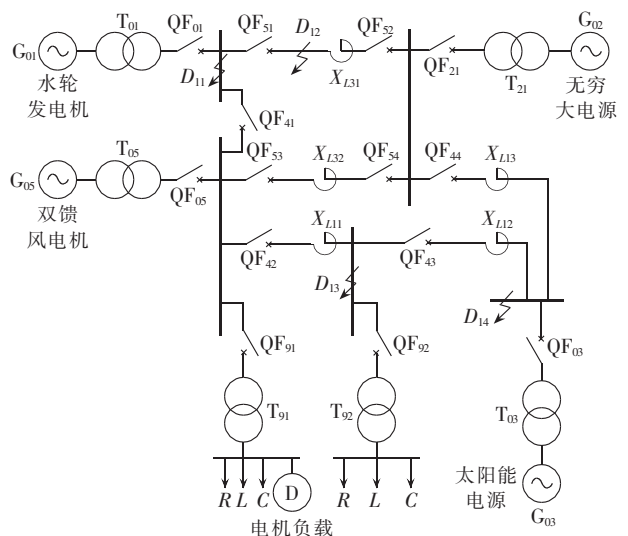


图 2 中压动模实验室一次接线图

Fig.2 Primary wiring diagram of mid-voltage dynamic simulation lab

根据图 2 动模实验接线方式及设备参数配置,利用 MATLAB 的 Simulink 工具箱建立中压动模实验线路仿真模型,并在全相角范围内,以故障电流瞬时标幺值与小波分解第 4 尺度细节分量瞬时标幺值随时间变化情况,阐述中压短路故障早期检测的机理;同时,为了说明本文提出的中压故障早期检测方法不受中压系统线路负载突变的影响,本文将全相角范围内 1.5 倍突变负载电流小波分解第 4 尺度细节分量标幺值的最大值与短路电流小波分解第 4 尺度细节分量标幺值加以比较分析。上述标幺值均以正常运行时各量幅值为基值。

对于中压交流系统,故障发生瞬间电源电压或线路电流相角(即故障初相角)对故障后短路电流的发展影响很大。图 3 以 10° 故障初相角为间隔,给出了故障发生后 4 个不同时刻短路电流及其小波分解第 4 尺度细节分量标幺值与故障初相角之间的关系,并给出全相角范围内 1.5 倍突变负载电流小波分解第 4 尺度细节分量标幺值的最大值。图 3 中, d_{s4} 为短路电流小波第 4 尺度细节分量标幺值; i_s 为短路故障电流瞬时标幺值; d_{14} 为全相角下 1.5 倍突变负

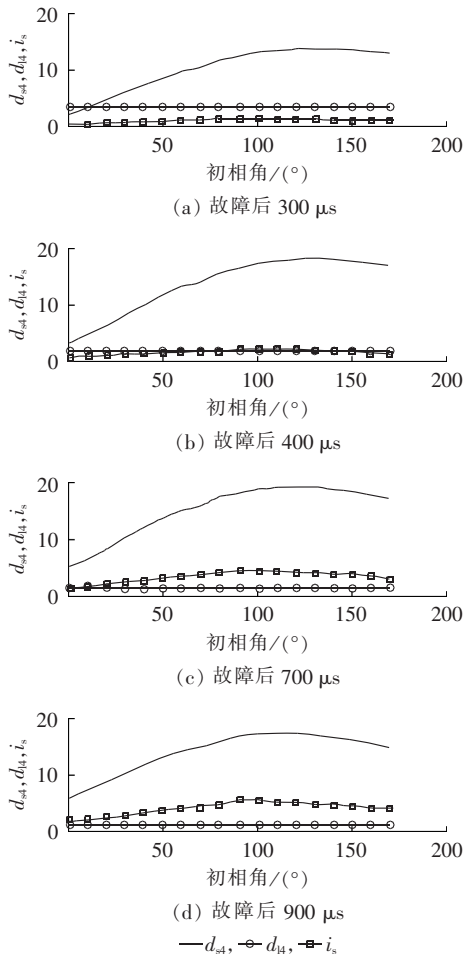


图 3 各变量早期不同时刻随初相角变化情况
Fig.3 Variation curve vs. initial phase angle for different variables and different instants in early period

载电流小波第 4 尺度细节分量标幺值的最大值。

从图 3 可见,在故障发生早期即短路故障电流较小时,采用短路电流小波分解第 4 尺度细节分量标幺值,已可在全相角范围内实现负载突变与短路故障的有效区分;而且故障发生 400 μs 之后,短路电流第 4 尺度小波分量标幺值均明显大于全相角下 1.5 倍突变负载电流小波第 4 尺度分量标幺值的最大值。这表明,设置适当的阈值,不仅可实现短路故障早期检测,而且可有效避免中压线路负载突变引起误判。

2.2.2 中压短路故障早期检测实验验证

本文以 TMS320F2812 为核心处理器,以小波分解第 4 尺度细节分量瞬时标幺值为判据并设置适当的故障判定阈值,开发了中压短路快速检测装置,在动模实验室工况环境下验证中压短路故障早期检测的技术实现。

图 4 为动模实验室短路故障三相电流波形、不同故障初相角下故障相电流及短路早期故障检测装置脱扣信号实测波形(实验中均转换为电压形式)。

本文经多次不同故障初相角短路试验得出,中压动模实验系统在单相短路故障时,从短路发生到给出故障早期检测脱扣信号的时间为 400~700 μs , 验

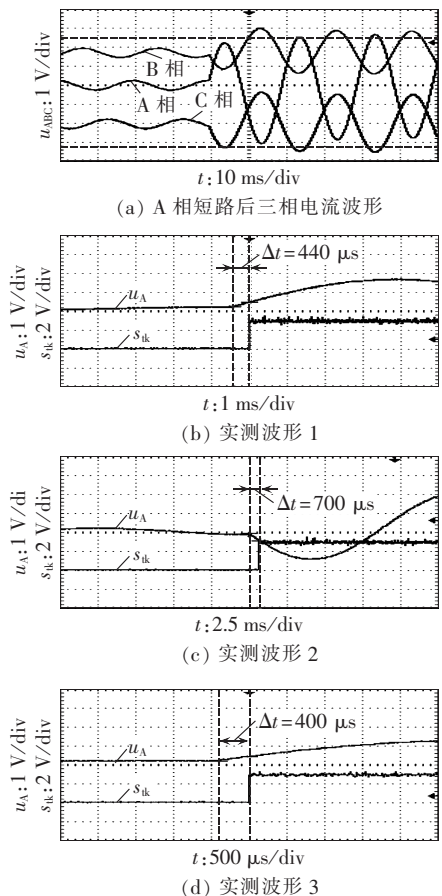


图 4 故障相电流和脱扣信号实测波形
Fig.4 Measured waveform of faulty phase currents and trip signals

证了中压系统短路故障早期检测的可行性。

3 中压短路故障早期检测的快速限流技术

本文以图 5 所示中压配电系统为例,利用 MATLAB 仿真馈线短路故障情况,在此基础上分析短路故障早期检测的快速限流技术。图 5 中,系统电源等值为单机无穷大,35 kV 等级;系统为中性点接地接线方式,电源初相角为 90° ;线路长度 $l=50$ km,线路电阻 $r=0.02 \Omega/\text{km}$,线路电导 $b=4.804 \mu\text{S}/\text{km}$,线路电抗 $x=0.28 \Omega/\text{km}$;变压器的变比为 37 kV/10.5 kV,短路阻抗百分比为 7.5%,空载电流百分比为 0.8%,短路损耗 $P_s=12$ kW,空载损耗 $P_0=24$ kW,额定容量 $S_b=7.5 \text{ MV}\cdot\text{A}^{[21]}$ 。故障点在靠近变压器侧,故障设置在系统正常运行后 50 ms 时发生,设定故障类型为 A 相接地故障。



图 5 仿真系统结构图

Fig.5 Structure of simulation system

显然,短路故障持续时间越短,对短路电流的限制效果就越好,短路造成的危害也就越小。因此,对中压短路故障进行早期准确检测与辨识具有实质性的应用效应。在故障早期,当判断的确有短路故障发生时,则触发 GTO 导通将 FCL 快速接入线路,可有效地限制短路电流。

实际的工作环境下,要实现 FCL 早期投入,其所需时间主要包括短路故障早期检测及识别所需时间和电力电子开关导通所需时间两部分。前文已经通过仿真以及实验验证了中压系统短路故障早期检测所需时间为 $400\sim 700 \mu\text{s}$,而 GTO 的导通时间仅为几十微秒,综合考虑 GTO 导通时间及不同故障相角等因素,短路故障早期检测辨识及 FCL 投入所需时间在 1 ms 之内。

本文以图 1 所示串联谐振型 FCL 为模型实现短路故障早期检测基础上的快速限流技术,以限流效果及断路器开断短路故障的苛刻度为指标考察其有效性。其中,FCL 参数为: $C=207 \mu\text{F}$; $L_1=3.26 \text{ mH}$; $L_2=48.94 \text{ mH}^{[22]}$ 。

3.1 故障早期 FCL 投入时刻对限流的影响

为分析 FCL 投入时刻对限制电流的影响,本文设置仿真电源初相角均为 90° ,分别选取故障发生后 40 ms(2 个全波周期)、20 ms(1 个全波周期)、10 ms(常规短路判据所需时间数量级)^[23]、1 ms(基于短路早期检测所需时间数量级)投入 FCL,短路电流抑制效果如图 6 所示。

由图 6 可见,系统未装设 FCL 时,短路电流峰值接近 10 kA;安装了 FCL 以后,其对系统的短路电

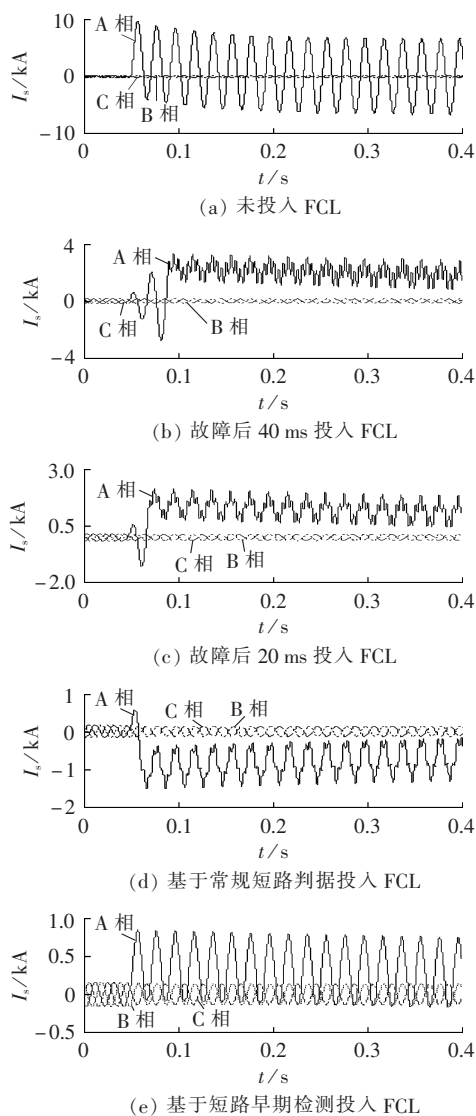


图 6 FCL 投入时刻对限制电流的影响

Fig.6 Influence of FCL put-into-operation time on current limiting effect

流有明显的抑制作用。此外,FCL 的投入时刻对于其限流效果影响很大,发生短路故障后投入 FCL 越早,其限流作用越明显。常规的短路判断方法一般需要 10 ms 左右判定时间,此时投入 FCL,只能将故障电流峰值限制在大约 1500 A;利用短路早期检测及快速投切技术,可实现在故障后 1 ms 即投入 FCL,在相同的短路故障情况下,其可将故障电流峰值限制在 800 A 左右,限流效果更加明显,并且其限流后的电流波形更光滑,对电网的冲击很小。

为了更清晰地说明 FCL 投入时刻对限制电流的影响,假设短路故障发生在系统正常运行后的 50 ms 时,本文取故障发生后 1~40 ms 的区间范围,分别每间隔 2 ms 投入 FCL,仿真得出相应时刻的电流峰值,利用三次正弦和拟合,得到故障电流峰值与 FCL 投入时刻的关系见图 7。

从图 7 可以看出,FCL 的投入时刻对于故障电

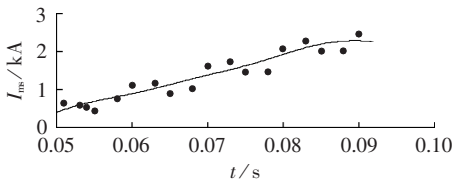


图 7 故障电流峰值与 FCL 投入时刻关系图

Fig.7 Relationship between fault current peak and FCL put-into-operation time

流的限制有很大影响,基于短路故障早期检测的故障电流快速限制效果非常显著。

3.2 故障早期 FCL 投入时刻对断路器开断能力影响

串联谐振型 FCL 应用于中高压甚至超高压电网,能够有效地抑制系统的短路电流水平,然而断路器的开断负担不仅与开断电流有关,还与瞬态恢复电压的第 1 个峰值、断口间的瞬态恢复电压上升率^[24]等因素有关。因此,需要综合考虑以上因素,从苛刻度^[25-26]的角度分析 FCL 对断路器开断性能的影响,通过综合断路器开断电流、断路器瞬态恢复电压第 1 个峰值和瞬态恢复电压上升率 3 项指标,对断路器开断短路故障的难度进行评估。

基于故障早期检测的 FCL 技术可以在短路发生早期投入 FCL,可以预见其对于提高断路器开断短路故障能力方面有显著作用。利用短路电流 I_s 、电流过零时断路器瞬态恢复电压的上升率 r_{RV} 以及断路器瞬态恢复电压的第 1 个峰值 U_{t1} ,可获得电网对于断路器的苛刻度 F 如式(2)所示。苛刻度可用于综合评估安装串联谐振型 FCL 后对于断路器开断的影响^[27]。

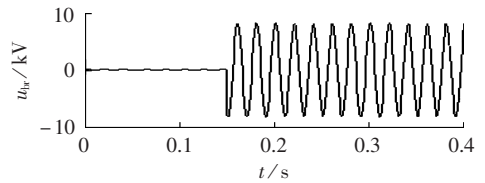
$$F = I_s (r_{RV})^\alpha U_{t1} \quad (2)$$

其中, α 为常数,它与断路器的灭弧方式及灭弧介质有关。

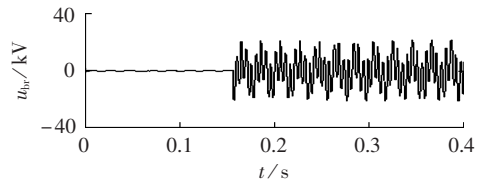
为了验证基于短路早期检测的 FCL 技术能够提升断路器短路故障开断能力,利用前述配电仿真系统加以分析,且配电系统的结构参数与短路参数均保持不变。断路器在系统运行至 150 ms 时因短路故障而操作分断故障电流。未投入 FCL、采用常规判据投入 FCL、基于短路早期检测快速投入 FCL 情况下断路器两端断口电压的仿真波形如图 8 所示。

综合图 6 与图 8 的仿真结果,取 $\alpha=1$,通过计算得到不同短路故障抑制情况下电网对断路器的苛刻度 F ,如表 1 所示。

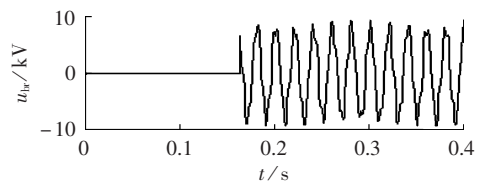
由表 1 可以看出,采用常规的短路判据投入 FCL 后,虽然降低了断路器的分断苛刻度,但是其限流后的短路电流峰值 I_s 、电流过零时断路器瞬态恢复电压的上升率 r_{RV} 以及断路器瞬态恢复电压的第 1 个峰值 U_{t1} 仍然较大,所以导致其整体的断路器分断苛刻度依然偏高;而基于短路早期检测快速投入 FCL



(a) 未投入 FCL



(b) 基于常规短路判据投入 FCL



(c) 基于短路早期检测投入 FCL

图 8 FCL 在不同时刻投入时断路器两端电压波形图

Fig.8 Waveform of breaker voltage between two terminals for different FCL put-into-operation time

表 1 不同情况下断路器的苛刻度

Table 1 Severity of circuit breaker for different conditions

短路抑制方式	I_s/kA	$r_{RV}/(kV \cdot \mu s^{-1})$	U_{t1}/kV	F
未投入 FCL	9.6	26.3	5.26	1328.0
基于常规短路判据投入 FCL	1.5	8.2	16.50	203.0
基于短路早期检测投入 FCL	0.8	3.4	6.80	18.5

后,上述 3 个参数均大幅度降低,使得断路器分断苛刻度大幅度减小,即断路器对短路故障的开断难度大幅降低。

综上所述,基于短路故障早期检测的 FCL 快速限流技术,在提升断路器的开断能力与遮断容量方面有着良好的应用潜力。

3.3 全相角范围内的 FCL 早期投入故障限流作用

故障初相角对于系统的短路影响较大,因此有必要考虑在不同初相角下,早期故障检测及 FCL 投入的限流效果以及对断路器分断苛刻度的影响。

本文在故障电源初相角 $0^\circ \sim 170^\circ$ 范围内以 10° 为 1 个间隔,分别仿真分析未投入 FCL、采用常规短路判据投入 FCL 以及短路故障早期检测投入 FCL 后的短路电流峰值和断路器的分断苛刻度,结果分别如表 2 与表 3 所示。表中,方式 a、b、c 分别对应未投入 FCL、基于常规短路判据投入 FCL 和基于短路早期检测投入 FCL。

分析表 2 及表 3 的相关参数数据可知,在全相角范围内,基于短路早期检测的 FCL 技术的限流效果均优于基于常规判据投入 FCL;而在断路器分断

表 2 全相角情况下的限流效果

Table 2 Fault current limiting effect in full phase-angle condition

相角/ (°)	I_m/kA			相角/ (°)	I_m/kA		
	方式 a	方式 b	方式 c		方式 a	方式 b	方式 c
0	11.76	0.97	0.83	90	9.60	1.51	0.84
10	12.08	0.89	0.83	100	8.65	1.49	0.78
20	12.36	0.93	0.91	110	7.62	1.44	0.70
30	12.50	1.03	0.92	120	6.74	1.36	0.61
40	12.41	1.14	0.93	130	7.69	1.28	0.52
50	12.17	1.21	0.96	140	8.63	1.19	0.50
60	11.76	1.33	0.96	150	9.52	1.09	0.60
70	11.18	1.43	0.94	160	10.33	0.96	0.69
80	10.45	1.49	0.90	170	11.04	0.81	0.77

表 3 全相角情况下的断路器苛刻度

Table 3 Severity of circuit breaker in full phase-angle condition

相角/ (°)	F			相角/ (°)	F		
	方式 a	方式 b	方式 c		方式 a	方式 b	方式 c
0	1561.7	92.3	8.4	90	1328.0	203.0	18.5
10	427.6	157.1	5.3	100	1211.9	105.6	26.2
20	433.8	99.8	12.7	110	1191.8	158.5	28.0
30	437.5	257.5	13.6	120	958.4	128.1	19.6
40	435.6	227.0	10.8	130	1088.1	86.9	12.3
50	429.6	125.8	7.8	140	1240.1	47.5	13.2
60	1557.0	264.4	3.8	150	1318.5	149.9	25.5
70	404.7	320.6	1.4	160	1411.1	109.1	34.4
80	1424.3	280.9	6.8	170	1487.1	125.6	28.0

苛刻度方面,基于短路早期检测的 FCL 技术同样在全相角范围内显示出了更加优异的特性。这表明,基于短路早期检测的 FCL 技术在降低断路器对分断能力的要求方面,显示出了良好的应用潜力。

4 结论

本文提出一种中压线路短路早期检测及其故障快速限流技术,并以固态可控串联谐振型 FCL 为例,通过实验与验证,得出如下结论:

a. 采用 Mallat 算法的多分辨小波变换,可有效实现中压线路短路故障的早期检测辨识,且在中压动态模拟系统中进行了验证;

b. 基于短路早期检测的 FCL 限流技术具有快速及显著的故障抑制作用;

c. 基于短路早期检测的 FCL 快速限流技术,可大幅度地降低中压线路分断苛刻度;

d. 基于短路故障早期检测的 FCL 快速限流技术,具备全相角范围内优越的限流效果,可较大幅度地降低断路器对分断能力的要求;

e. 在限制短路电流与提升断路器开断能力方面,中压短路早期限流技术对增强电网稳定性具有良好的应用潜力,但有待进一步研究。

参考文献:

[1] 武守远,荆平,戴朝波,等. 故障电流限制技术及其新进展[J]. 电

网技术,2008,32(24):23-32.

WU Shouyuan, JING Ping, DAI Chaobo, et al. Fault current limiting measures and their recent progress[J]. Power System Technology, 2008, 32(24):23-32.

[2] 袁娟,刘颖,董明齐,等. 西北电网短路电流的限制措施[J]. 电网技术,2007,31(10):42-45.

YUAN Juan, LIU Wenyong, DONG Mingqi, et al. Application of measures limiting short circuit currents in Northwest China Power Grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(10):42-45.

[3] 徐贤,丁涛,万秋兰. 限制短路电流的 220 kV 电网分区优化[J]. 电力系统自动化,2009,33(22):98-101.

XU Xian, DING Tao, WAN Qiulan. 220 kV power grid district-dividing optimization for limiting fault current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22):98-101.

[4] 阮前途. 上海电网短路电流控制的现状与对策[J]. 电网技术, 2005, 29(2):81-86.

RUAN Qiantu. Present situation of short circuit current control in Shanghai Power Grid and counter measures[J]. Power System Technology, 2005, 29(2):81-86.

[5] 周雪松,向龙瑞,马幼捷,等. 故障限流装置的发展和应用[J]. 电工技术学报,2004,19(11):1-7.

ZHOU Xuesong, XIANG Longrui, MA Youjie, et al. The development and application of fault current limiting device[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(11):1-7.

[6] 李锡芝. CLIP 限流保护器在中压配电系统中的应用初探[J]. 电力设备,2006,7(4):56-59.

LI Xizhi. Discussion on application of CLIP current limiting protector in MV system[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(4):56-59.

[7] 徐向东. 快速限流装置在电力系统中的应用[J]. 高压电器,2007, 43(4):295-297.

XU Xiangdong. Application of Is-limiter in electrical network[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(4):295-297.

[8] 王梅义,吴竟昌,蒙定中. 大电网系统技术[M]. 北京:中国电力出版社,1995.

[9] 陈丽安. 保护电器的短路故障早期检测及实现的研究[D]. 福州:福州大学,2004.

CHEN Lian. Research on early detection and implementation of short-circuit faults for protection apparatus[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2004.

[10] 薛蕊,杨仁刚,罗红,等. 利用小波变换分析配电网电能质量扰动[J]. 电网技术,2003,27(7):60-65.

XUE Hui, YANG Rengang, LUO Hong, et al. Analysis of power quality disturbance in distribution network by wavelet transform [J]. Power System Technology, 2003, 27(7):60-65.

[11] 陈丽安,张培铭,缪希仁. 基于小波变换的低压系统短路故障的早期预测[J]. 电工技术学报,2003,18(2):91-94.

CHEN Lian, ZHANG Peiming, MIAO Xiren. Prediction for the short-circuited fault based on wavelet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(2):91-94.

[12] 陈丽安,张培铭. 基于形态小波的低压系统短路故障早期检测[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):25-28.

CHEN Lian, ZHANG Peiming. Early detection for short-circuit fault in low-voltage systems based on morphology-wavelet [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10):25-28.

[13] KREUTZ R, BOCK J, BREUER F, et al. System technology and test of CURL 10, a 10 kV, 10 MV·A resistive high-TC superconducting fault current limiter[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2005, 15(2):1961-1964.

[14] TSUDA M, WLITANI Y, TSUJI K, et al. Application of resistor based superconducting fault current limiter to enhancement of power system transient stability[J]. IEEE Trans on Applied

- Superconductivity, 2001, 11(1):2122-2125.
- [15] SUGIMOTO S. Principe and characteristics of a fault current limiter with series compensation[J]. IEEE Trans on PWRD, 1996, 11(3):842-847.
- [16] 袁清芳, 李兴源. 具有可控串联补偿的新型故障限流器的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(1):40-43.
YUAN Qingfang, LI Xingyuan. Study of a new fault current limiter with controllable series compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(1):40-43.
- [17] 孙树敏, 刘洪顺, 李庆民, 等. 电力系统故障限流器研究综述[J]. 电网技术, 2008, 32(21):75-79.
SUN Shumin, LIU Hongshun, LI Qingmin, et al. A summarization of research on fault current limiter of power system[J]. Power System Technology, 2008, 32(21):75-79.
- [18] 袁清芳, 李兴源. 具有串联补偿作用故障限流器的模糊稳定控制器[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3):24-27.
YUAN Qingfang, LI Xingyuan. Fussy stable controller of a fault current limiter with series compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3):24-27.
- [19] 吴守龙, 鲍光海. 基于 TMS320F2812 的短路故障早期检测技术[J]. 低压电器, 2013(6):21-29.
WU Shoulong, BAO Guanghai. Early detection technology of short-circuit fault based on TMS320F2812[J]. Low Voltage Apparatus, 2013(6):21-29.
- [20] 张兆宁, 毛鹏, 孙雅明. 电力系统故障暂态信号的小波奇异性检测[J]. 继电器, 2000, 28(4):24-27.
ZHANG Zhaoning, MAO Peng, SUN Yaming. Singularity of fault transient signals in power system[J]. Relay, 2000, 28(4):24-27.
- [21] 曾琦, 李兴源, 蔡鑫贵, 等. 带串联补偿故障限流器的仿真和实验[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14):54-56.
ZENG Qi, LI Xingyuan, CAI Xingui, et al. Simulation and test of fault current limiter with series compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(14):54-56.
- [22] 王华昕, 习贺勋, 汤广福, 等. 谐振型故障限流器阻抗特性仿真和参数优化[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5):61-64.
WANG Huaxin, XI Hexun, TANG Guangfu, et al. Simulation and parameters optimization of the resonance fault current limiter resistance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(5):61-64.
- [23] 郑昕, 张培铭, 陈丽安. 低压系统短路电流快速分断控制实现的研究[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(4):48-51.
- ZHENG Xin, ZHANG Peiming, CHEN Lian. Research on realizing of fast opening of short-circuit faults for low voltage system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2008, 27(4):48-51.
- [24] 刘洪顺, 李庆民, 姜杰, 等. 电感型 FCL 对断路器恢复电压上升率的影响[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12):84-91.
LIU Hongshun, LI Qingmin, LOU Jie, et al. Impact of inductive FCL on the RRRV of circuit breakers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12):84-91.
- [25] CHEN S, WU Y, LUCK B. Combined genetic algorithm optimization and regularized orthogonal least squares learning for radial basis function networks[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1999, 10(5):1239-1243.
- [26] 郑丕涛, 马艳华. RBF 神经网络的阶梯遗传算法训练新方法[J]. 控制与决策, 2000, 15(2):165-168.
ZHENG Pie, MA Yanhua. A new hierarchical genetic algorithm for training of RBF neural network[J]. Control and Decision, 2000, 15(2):165-168.
- [27] 耿淑娟, 张君捧, 张明玉. 串联谐振型 FCL 对高压断路器开断短路故障的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18):32-37, 42.
GENG Shujuan, ZHANG Junpeng, ZHANG Mingyu. Influence of serial-resonant FCL on the characteristics of circuit breakers during short-circuit faults[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18):32-37, 42.

作者简介:



缪希仁

缪希仁(1965—),男,福建宁德人,教授,博士,主要从事电器及其系统智能化技术、电气设备在线监测与诊断、新型电器技术等方面的研究(E-mail: mxr@fzu.edu.cn);

李 颀(1986—),男,江西抚州人,硕士研究生,研究方向为智能电器以及在线监测技术;

吴晓梅(1990—),女,福建福州人,硕士研究生,研究方向为智能电器及在线监测技术;

鲍光海(1977—),男,福建莆田人,副教授,博士,研究方向为智能电器及在线监测技术;

吴守龙(1989—),男,福建宁德人,硕士研究生,研究方向为智能电器及在线监测技术。

Short circuit current limiting technology based on early detection for mid-voltage system

MIAO Xiren, LI Biao, WU Xiaomei, BAO Guanghai, WU Shoulong

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: A fault current limiting technology based on early short circuit detection is proposed to improve the performance of FCL(Fault Current Limiter) for mid-voltage system. A fault simulation model of mid-voltage power distribution system is built and the Mallat multi-scale wavelet transform is applied to realize the early short circuit detection. Its effectiveness is verified by taking the mid-voltage dynamic simulation system as the object. With the series resonant FCL as an example, the short circuit current limiting effect is compared between the conventional and the proposed short circuit detection methods. With the breaking severity of circuit breaker as an indicator, the influence of early short circuit detection on the breaking capability is analyzed and the simulative results show its better breaking performance.

Key words: mid-voltage system; electric power distribution; short circuit currents; wavelet transforms; fault detection; early detection; fault current limiter; breaking severity