

单相 VSC 系统宽频阻抗测量装置保护方案研究

李小鹏¹, 曾奕¹, 潘鹏宇¹, 冯昌隆², 姜晓锋¹, 胡海涛², 陶海东²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要:宽频阻抗测量装置在获取单相 VSC 系统的阻抗特性中发挥着重要作用, 由于阻抗测量装置需要接入系统进行能量交换, 其自身应当具备合理的故障保护措施来保障装置和系统的运行安全。针对单相 VSC 系统阻抗测量装置的故障保护策略尚不完善, 提出了一种单相 VSC 系统阻抗测量装置的故障保护方案。首先, 选择了基于背靠背变流器结构的阻抗测量装置来研究保护策略; 其次, 分析了背靠背阻抗测量装置的特点及其对保护配置产生的影响, 设计了适用于装置的保护方案; 最后, 基于 Matlab/Simulink 平台, 通过几种典型的短路故障情形验证了所提出装置保护方案的可行性与有效性。

关键词:单相 VSC 系统; 宽频阻抗测量装置; 背靠背变流器; 保护方案

中图分类号:U 223 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2024)04-0001-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240401

Research on Protection Scheme of Broadband Impedance Measurement Device for Single-phase VSC System

LI Xiaopeng¹, ZENG Yi¹, PAN Pengyu¹, FENG Changlong², JIANG Xiaofeng¹, HU Haitao², TAO Haidong²
(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract: Broadband impedance measurement devices play an important role in obtaining the impedance characteristics of single-phase VSC systems, because impedance measurement devices need to be connected to the system for energy exchange, they should have reasonable fault protection measures to ensure the operation safety of devices and systems. However, the fault protection strategy for impedance measurement devices in single-phase VSC systems is not perfect. A fault protection scheme for impedance measurement devices in single-phase VSC systems is proposed. Firstly, the impedance measurement device based on back-to-back converter structure is selected to study the protection strategy. And then, the characteristics of impedance measurement device and its influence on the protection configuration are analyzed, and a comprehensive protection scheme is designed. Finally, based on Matlab/Simulink platform, the feasibility and effectiveness of the proposed device protection scheme are verified by several typical short-circuit fault scenarios.

Key words: single-phase VSC system; broadband impedance measurement device; back-to-back converters; protection scheme

0 引言

随着电力电子变流技术的快速发展, 电压源型变流器 (voltage source converter, VSC) 作为核心变流设备, 广泛应用于新能源变流器、电力机车变流

基金项目: 国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目 (52027810); 国网四川省电力公司科技项目 (52199723002K)

器、电动汽车充电器等多个领域。由于 VSC 变流设备的非线性时变、非对称耦合特性以及特征谐波的宽频化, 在 VSC 并网系统中频繁发生一系列诸如谐波振荡、低频振荡、谐波不稳定等宽频带振荡问题^[1-2]。现有理论普遍认为, 此类振荡问题的产生是因为 VSC 设备和供电系统之间的阻抗不匹配^[3-4]。因此获取 VSC 设备和供电网络的阻抗特性对于分析这类振荡问题具有重要意义。

在获取 VSC 设备阻抗的方法中,基于扰动注入的主动式测量方法由于测量精度高、测量原理简单等优势,是当前获取 VSC 设备阻抗与供电网络阻抗的主要方法,已成为研究热点^[5-6]。针对“VSC-供电网”系统,现有的阻抗测量装置可以分为单频主动测量装置和宽频主动测量装置。其中,宽频主动阻抗测量装置可以一次性向系统中注入多个频率的谐波扰动,继而同时测量多个频率点的谐波阻抗,与单频测量方法相比大大提高了测量的速度,具有显著优势^[7-8],已在“VSC-供电网”系统的阻抗测量方面得到广泛研究。

现有的宽频阻抗测量装置主要有两种:基于蝶形扰动电路的宽频谐波扰动装置^[9-10]和基于背靠背变流设备的谐波扰动装置^[11]。基于蝶形扰动电路的宽频谐波扰动装置发出的扰动信号能量分布不均匀,信噪比低,阻抗测量精度相对较低。而基于背靠背变流设备的谐波扰动装置可以向系统注入频带双边可控、幅值分布均匀的宽频谐波扰动电压,在保证测量速度的同时兼顾了测量精度。

现有对于阻抗测量装置的保护未能详细反映各类故障且未对阻抗测量装置区别于其他变流器的特殊之处进行探究^[12-14],因此面向“VSC-供电网”系统的阻抗测量装置还缺乏细致的保护策略。

基于上述背景,下面对基于背靠背变流设备的阻抗测量装置保护策略开展了研究。首先,对基于背靠背变流结构的阻抗测量装置进行了介绍,在此基础上分析了阻抗测量装置接入“VSC-供电网”系统过程中的一些特点及其对保护配置带来的影响;然后,结合主动式阻抗测量装置的短时接入、注入谐波扰动等特点,根据保护设计原则提出了针对基于背靠背变流设备的阻抗测量装置保护方案,实现对阻抗测量装置的有效保护;最后,基于 Matlab/Simulink 仿真验证了所提保护方案的正确性和有效性。

1 背靠背宽频阻抗测量装置

基于背靠背变流结构的阻抗测量装置的拓扑结构如图 1 所示。装置由多绕组变压器、 n 组级联的背靠背变流器、滤波电感和宽频耦合变压器组成^[11]。

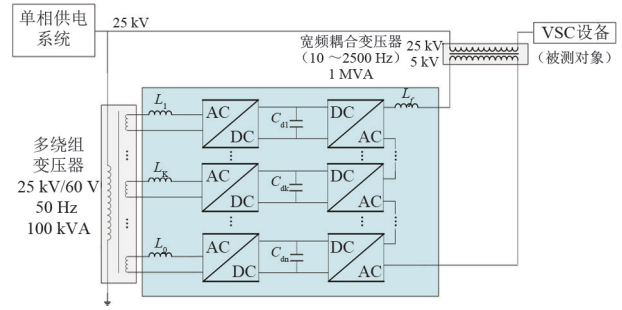


图 1 基于背靠背变流结构的阻抗测量装置拓扑结构

装置采用多绕组变压器降低各模块的输入电压,使背靠背变流器可以经单相 25 kV 供电网取电。图 1 中: $L_{L1}, L_{Lk}, \dots, L_{Ln}$ 为交流侧滤波电感; $C_{d1}, C_{d2}, \dots, C_{dn}$ 为直流侧电容器; L_{Lr} 为交流输出侧滤波电感,用于滤除不需要的高频谐波。阻抗测量装置借助多绕组变压器从供电网取电,再经多组级联的背靠背变流器进行电能变换;最后,通过宽频耦合变压器向系统输出宽频电压扰动,其逆变器控制的宽频扰动输出可以由式(1)表述。

$$y_{\text{mtone}} = K \cdot \sqrt{\frac{1}{N_{\text{tone}}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{tone}}} \sin \left[2\pi f_i t + \pi \frac{(i-1)^2}{N_{\text{tone}}} \right] \quad (1)$$

式中: K 为扰动幅值; N_{tone} 为所期望频率的数量; f_i 为第 i 个频率点,可由 $f_i = f_0 + i \cdot \Delta f$ 得到,其中 f_0 为起始频率, Δf 为频率分辨率; $\pi (i-1)^2 / N_{\text{tone}}$ 为 f_i 的相移,使峰值保持在 $1.5K$ 之下。

其控制策略由两部分组成,其中,左 H 桥变换器作为整流器,采用双闭环 dq 解耦控制,得到稳定的直流侧输出电压;右 H 桥逆变器采用开环多级调制技术,结合直流侧电压与式(1)的多音调信号可以实现对扰动输出电压的幅度、频率控制。

2 阻抗测量装置的特点及其影响

2.1 短时接入特点对保护配置带来的影响

一般来说,宽频阻抗测量装置要获取所需频带的阻抗往往需要一次至几次的测量过程,而每次测量过程很短,通常只需要几十秒,所以从阻抗测量开始到完成测量进而切除装置所需时间很短,要保障整个测量过程中“VSC-供电网”系统和阻抗测量装置的安全需要考虑装置短时接入的特点。装置的正常接入、扰动注入以及测量完成后的正常切除应不影响系统的正常运行,所以需要强调装置的投入、运

行以及切除逻辑。

阻抗测量装置内外部开关器件的初始状态如图 2 所示,其中:QS1、QS2、QS3 为装置接入供电网络开关;QF1 为电源接入开关;QF2、QS4 为阻抗测量装置接入开关;QF3 为宽频耦合变压器 T2 二次侧投入开关;KM1 为旁路开关;QS5 为阻抗测量装置输出端接入开关;所有开关器件处于断开状态。当测量装置需要投入使用时,投入步骤如下:

1) 装置接入时应合上 QS1、QS3、KM1、QF1,将 VSC 设备接入单相电源。

2) 待 VSC 设备稳定运行后,合上 QS4、QF2,使得多绕组变压器 T1、变流器组接入电源,利用充电电阻对整流器和逆变器充电,使其达到稳态。

3) 断开 KM1,合上 QS5 和 QF3,使得阻抗测量装置串联接入系统中,完成接入过程。

4) 在装置接入系统后,控制增大逆变器控制环节的参数 K ,实现扰动从小到大的注入过程,避免瞬时接入对系统造成冲击。当扰动幅值增大到满足阻抗测量要求时,采集测量端口的电压、电流数据,完成阻抗测量过程。

当完成测量过程或测量过程中发生故障时,期望安全且快速地切除装置以保障装置与系统的安全。装置的主要切除步骤如下:

1) 测量完成或者发生故障后,应先将逆变器控制环节参数 K 调整到 0 或极小值,合上 KM1,断开 QF3、QS5 将装置输出端从供电网中切除;

2) 断开 QF2、QS4 将装置输入端从供电网中切除,实现整个装置的切除过程,不影响“VSC-供电网”系统的正常运行。

在装置或“VSC-供电网”系统发生故障时,由于测量装置的短时接入以及注入谐波的特性,期望在最短时间内切除装置来保护装置和系统的安全,且要保证在装置故障时不影响系统的正常运行,所以对装置保护的配置有两点要求:一是装置保护动作时间设定应小于供电网络所设保护的的动作时间;二是装置两端断路器之间应有配合关系,即任一断路器检测到断开信号时另一个断路器无论是否检测到断开信号都应进行断开操作,以此来保证装置的顺利切除。保护装置动作后,应按上述步骤迅速有效地切除阻抗测量装置。

2.2 注入宽频谐波对保护配置带来的影响

对于单相供电系统的保护来说,由于阻抗测量

装置向系统中输出宽频谐波,装置在接入系统并开始输出扰动后,谐波的干扰会引起一些保护误动或拒动,威胁供电系统的安全。同时,向系统中输入宽频谐波可能会带来一些谐波振荡和不稳定性问题,具体影响需要进一步探究。

对于阻抗测量装置保护来说,由于向系统注入宽频扰动输出时扰动值的大小是随控制环节的参数 K 变化的,所以不能简单地将输出电压电流扰动的额定值当作整定时的参考值,这对保护整定值的设置带来困难。这个问题将在整定值设置环节进行说明。

3 保护方案配置

3.1 保护配置原则

考虑到第 2 章所述内容,为了确保阻抗测量装置接入系统中的安全性,需要对既有保护整定值进行修正,同时要为阻抗测量装置配置相应的保护。保护的配置需要遵循以下原则:

1) “故障导向安全”原则,即设备发生故障时,能自动导向安全^[15];

2) 阻抗测量设备故障不会引起“VSC-供电网”系统保护误动;

3) “VSC-供电网”系统出现短路或其他故障后,阻抗测量装置能从系统中尽快切除,不再运行,不会使系统保护拒动。

3.2 保护策略

为对阻抗测量装置的保护方案进行设计,通过仿真手段对阻抗测量装置接入单相 VSC 系统的各类故障情形进行模拟,得到发生故障时各端口的电压、电流变化情况,并由此设计了基于背靠背变流器的阻抗测量装置保护方案。

针对阻抗测量装置的保护方案如图 2 所示。

装置的进口和出口分别配置有断路器 QF2 和断路器 QF3,在两个变压器的一次侧和二次侧分别配置了电压互感器和电流互感器,值得注意的是,在变压器 T1 的二次侧有 n 组级联的背靠背变流器,但是仅在其中一组配置电压互感器、电流互感器即可。当未配置电压互感器、电流互感器的背靠背变流器发生故障时,现有配置的互感器能够反映出对应故障的发生,在保障安全性的同时兼顾经济性。

依照装置保护原则,制定保护方案包含以下 4 部分:电气量保护、非电气量保护、变电所联跳保护

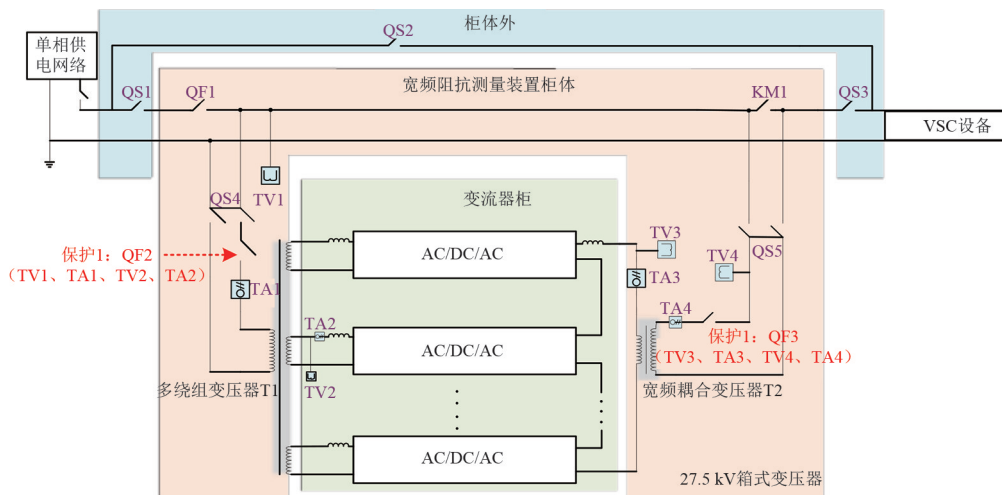


图 2 阻抗测量装置保护

以及断路器失灵保护。

1) 电气量保护

针对阻抗测量装置所设置的电气量保护包含过电压保护、过电流保护和欠电压保护。在两变压器的高压侧配置过电压保护、欠电压保护、过电流保护；在两变压器的低压侧配置欠电压保护、过电流保护。电流保护作为电压保护的后备保护。电气量保护均为常规保护方案^[16]，其保护整定值设置原理如式(2)、式(3)所示，其整定值及动作时限的设置如表 1 所示。

$$U_{\text{set}} = K_{\text{rel}} U_n \quad (2)$$

$$I_{\text{set}} = K_{\text{rel}} I_n \quad (3)$$

式中： U_n 、 I_n 分别为对应变压器对应侧的电压电流额定值； U_{set} 、 I_{set} 分别为电压保护和电流保护的整定值； K_{rel} 为可靠系数，过电压保护和过流保护可靠系数一般为 1.15~1.25，这里取值为 1.2，欠电压保护可靠系数取 0.6。

表 1 电气量保护配置

保护	安装位置	整定值	动作时限
过电压保护	变压器 T1 一次侧	$1.2U_n$	t_1
	变压器 T2 二次侧	$1.2U_{\text{rmax}}$	t_1
欠电压保护	变压器 T1 一次侧	$0.6U_n$	t_1
	变压器 T1 二次侧	$0.6U_n$	t_1
	变压器 T2 一次侧	$0.6U_z$	t_1
	变压器 T2 二次侧	$0.6U_z$	t_1
过电流保护	两变压器高压侧	$1.2I_n$	t_2
	两变压器低压侧	$1.2I_n$	t_2

表 1 中： U_n 、 I_n 分别为变压器对应侧的电压电流额定值； U_{rmax} 为扰动输出侧扰动期间电压有效值最

大值； U_z 为扰动输出侧未施加扰动时电压有效值。

对于变压器 T1 来说，T1 两侧的电压、电流较为稳定，所以按照常规整定值的取值方案进行整定即可；对于宽频耦合变压器 T2 来说，由于输出的是含大量谐波的电压扰动，所以装置输出侧的电压大小并非相对恒定的值，其随着扰动控制参数 K 的变化而变化，完整的一次扰动注入流程下装置输出侧的电压扰动波形及其有效值波形如图 3 所示，扰动从 0.6 s 开始注入并缓缓增加，0.8 s 处达到最大值，1.2 s 处扰动开始缓缓减小，1.4 s 消除扰动。可以看到在扰动注入前后装置输出侧的电压存在较大幅度的变化，扰动输出侧的电压有效值并非是一个相对恒定的值，为此采取的策略是将扰动期间电压有效值的最大值 U_{rmax} 作为对过电压保护进行整定的参考值，值得注意的是这里的有效值是包含谐波的有效值，并非仅含有基波的有效值。对于欠电压保护的整定值设置，将正常运行且未注入扰动时的电压值 U_z 作为对欠电压保护进行整定时的参考值，以此来实现短路故障发生时对装置的保护。

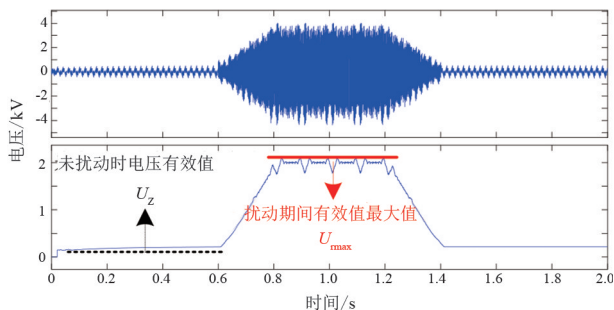


图 3 装置输出侧电压扰动波形及其有效值

t_1 为阻抗测量装置主保护的的动作时间，当“VSC

-供电网”系统或阻抗测量装置发生故障致使变压器高压侧过压或失压时,为尽快将阻抗测量装置从系统中切除,避免影响系统既有保护,取 t_1 为 0,采取无延时保护; t_2 为变压器过电流保护的動作时限,与阻抗测量装置安装处馈线主保护时限 t_k 相配合, $t_2 < t_k$ 。

当保护满足保护判据、断路器处于合位且保护系统判断故障为系统级故障时,保护系统闭锁变流器控制脉冲,发出保护信号至 QF2、QF3,使断路器断开,阻抗测量装置停止工作并脱离待测系统。

2) 非电气量保护

为了给阻抗测量装置提供全面、完善的保护,设置 IGBT 模块超温保护作为非电气量保护。

3) 变电所联跳保护

电气量及非电气量保护均为阻抗测量装置的的本体保护,“VSC-供电网”系统中可能存在装置保护检测不到或者灵敏度不够的故障类型,如重瓦斯保护故障、主变压器油箱内部故障等。当系统中出现此类故障时,阻抗测量装置需要与系统保护进行联跳,以满足“VSC-供电网”系统故障时阻抗测量装置能从中尽快切除的保护原则要求^[15]。

4) 断路器失灵保护

当阻抗测量装置进出口两侧的断路器由于跳闸线圈断线、操动机构失灵等情况而对故障拒动时,增设断路器失灵保护可以利用故障设备的保护信息和拒动断路器的电流信息构成对断路器失灵的判别,在较短时间内切除同一场站内其他有关断路器,使事故范围限制在最小,从而保证系统的安全稳定运行^[17]。

4 仿真验证

为了验证所提出的阻抗测量装置保护方案,基于图 2 所示拓扑结构与保护配置情况,对安装于单相供电网的阻抗测量装置典型应用案例进行故障仿真分析。单相供电系统参数如表 2 所示,阻抗测量装置参数如表 3 所示,阻抗测量装置保护配置及其整定值如表 4 所示。

下面分别给出供电网络短路故障、变压器 T1 二次侧短路、变压器 T2 一次侧和二次侧短路时的各保护动作情况,并以此分析保护方案的有效性。

1) 供电网络短路

模拟在 0.8 s 时发生供电网络短路故障,故障发

生时仿真结果如图 4 所示。

表 2 单相供电系统参数

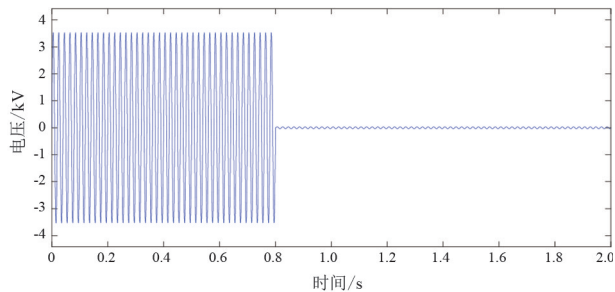
参数	数值
频率/Hz	50
电源/kV	25
网侧等效电阻/ Ω	1
网侧等效电感/mH	1
变压器容量/MVA	1
变压器一、二次侧额定电压/V	25 000/1770
VSC 单元个数	1
直流侧支撑电容/mF	9
直流侧等效负荷/ Ω	6.5
直流侧电压参考值/V	3600
开关频率/Hz	2500

表 3 阻抗测量装置参数

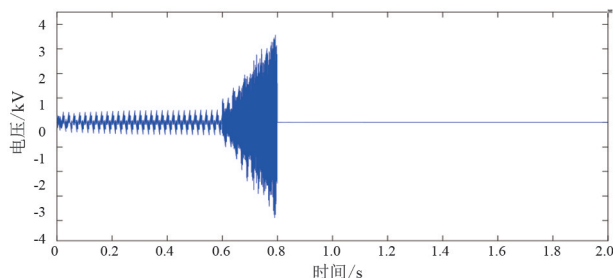
参数	数值
多绕组变压器容量/kVA	100
多绕组变压器一、二次侧电压/V	25 000/60
背靠背变流器模块个数	8
输入侧滤波电感/mH	2
直流侧电容/mF	10
左 H 桥变换器的开关频率/Hz	5000
直流侧参考电压/V	100
电流环 PI 参数	$k_{pi} = 2; k_{ii} = 50$
电压环 PI 参数	$k_{pu} = 1; k_{iu} = 50$
右 H 桥变换器的开关频率/Hz	5000
调节系数	0.5 或 0.7
输出侧滤波电感/mH	0.15
宽频耦合变压器容量/MVA	1
宽频耦合变压器变比	5/25

表 4 阻抗测量装置保护设置参数

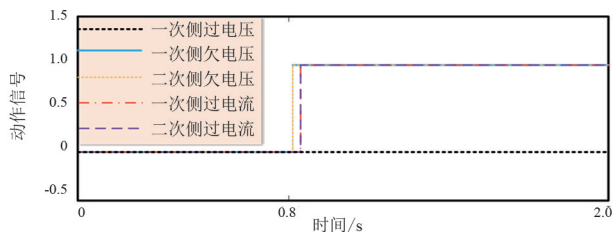
位置	保护	整定值	保护时限/s
T1 一次侧	过电压保护	30 kV	0
	欠电压保护	15 kV	0
	过电流保护	0.14 A	0.04
T1 二次侧	欠电压保护	36 V	0
	过电流保护	1.6 A	0.04
T2 一次侧	欠电压保护	10 V	0
	过电流保护	490 A	0.04
T2 二次侧	过电压保护	2.5 kV	0
	欠电压保护	125 V	0
	过电流保护	98 A	0.04



(a) 变压器T1一次侧电压波形



(b) 变压器T2二次侧电压波形



(c) 变压器T1侧保护动作情况

图 4 供电网短路故障仿真结果

供电网在 0.8 s 发生短路故障时, T1 一次侧电压迅速下降, 电流迅速上升, 根据仿真结果可以看到, 保护系统监测到供电网失压后欠电压保护动作, 跳开断路器 QF2 和 QF3, 同时闭锁变流器控制脉冲, 使得装置两边电压迅速归零, 将阻抗测量装置从系统中切除。

2) 变压器 T1 二次侧短路

模拟在 0.8 s 时发生变压器 T1 二次侧短路故障, 故障发生在任一背靠背变流器模块中, 故障发生时仿真结果如图 5 所示。由图可知, 故障发生后, 二次侧欠电压保护及电流保护正确动作。

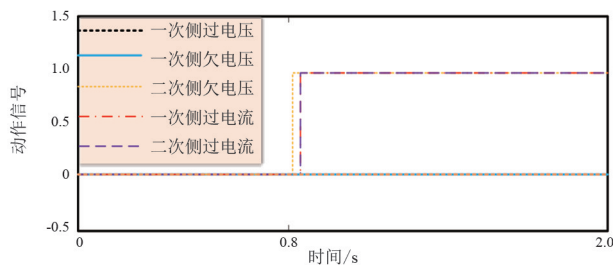


图 5 变压器 T1 二次侧短路故障保护动作情况

3) 变压器 T2 一次侧短路

模拟在 0.8 s 时变压器 T2 一次侧发生短路故

障, 故障发生时仿真结果如图 6 所示。由图可知, 故障发生后, 一、二次侧欠电压保护正确动作。

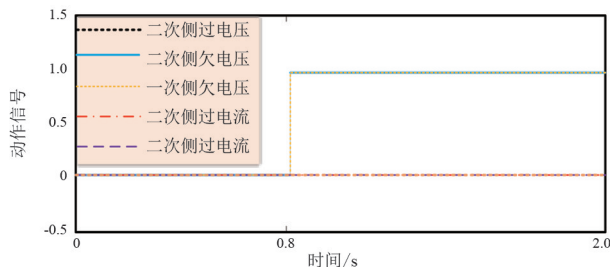


图 6 变压器 T2 一次侧短路故障保护动作情况

4) 变压器 T2 二次侧短路

模拟在 0.8 s 时发生变压器 T2 二次侧短路故障, 故障发生时仿真结果如图 7 所示。由图可知, 故障发生后, 一、二次侧欠电压保护正确动作。

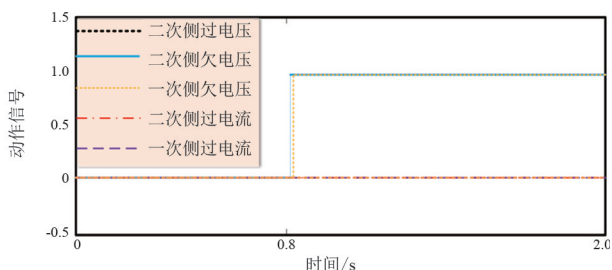


图 7 变压器 T2 二次侧短路故障保护动作情况

通过上述仿真结果可知, 在常见的故障情形下保护均能正常动作, 将阻抗测量装置从“VSC-供电网”系统中迅速切除, 保障阻抗测量装置的安全。

5 结论

针对阻抗测量装置接入“VSC-供电网”系统中的保护需求, 分析了基于背靠背变流器结构的阻抗测量装置的特点及其对保护设置产生的影响, 提出了一种基于背靠背变流器的阻抗测量装置保护方案, 通过常见短路故障仿真, 验证了所提方案的正确性与有效性。

1) 阻抗测量装置具有短时接入的特性, 因而对保护来说需要强调投切逻辑, 并在故障发生时优先将阻抗测量装置从系统中切除。

2) 阻抗测量装置具有注入谐波的特性, 对系统来说会造成装置输出侧电压电流有效值上升, 进而影响到“VSC-供电网”系统保护可靠性, 需要对系统既有保护整定值进行修正; 对装置来说, 扰动输出侧扰动电压大小存在变化, 要关注输出侧电压电流保护的整定值设置问题。

3)提出了一种“VSC-供电网”阻抗测量装置的故障保护方案,可为阻抗测量领域的保护研究提供参考。

上面仅对基于背靠背变流器的阻抗测量装置进行了保护策略的研究,但不同的阻抗测量装置有着不同的拓扑结构,其保护方法不尽相同,因此所提保护方案有一定的应用局限性。另外,对所提保护方案的验证仅停留在仿真阶段,还需要进一步的实物实验验证。

参考文献

- [1] HU Haitao, TAO Haidong, BLAABJERG Frede, et al. Train-network Interactions and stability evaluation in high-speed railways-Part I: phenomena and modeling [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(6): 4627-4642.
- [2] 肖冬华,胡海涛,潘鹏宇,等.高速列车 dq 阻抗测量方法及其装置设计 [J].中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7230-7240.
- [3] LIU Zhigang, ZHANG Guinan, LIAO Yicheng. Stability research of high-speed railway EMUS and traction network cascade system considering impedance matching [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(5): 4315-4326.
- [4] DANIELSEN S, FOSSO O B, MOLINAS M, et al. Simplified models of a single-phase power electronic inverter for railway power system stability analysis - Development and evaluation [J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(2): 204-214.
- [5] SANTOSO S, MAITRA A. Empirical estimation of system parallel resonant frequencies using capacitor switching transient data [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1151-1156.
- [6] 李尚盛,吴楠,查晓明.基于电容器分组投切的电网谐波阻抗特性研究 [J].高电压技术, 2016, 42(10): 3354-3360.
- [7] ROINILA Tomi, MESSO Tuomas. Online grid-impedance measurement using ternary-sequence injection [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 5097-5103.
- [8] 杨向阳,胡海涛,肖冬华,等.电气化铁路“车-网”系统串/并联双模式宽频谐波扰动产生装置设计与测量方法 [J/OL].中国电机工程学报; 1-5 [2024-06-28]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230094.
- [9] HU Haitao, PAN Pengyu, SONG Yitong, et al. A novel controlled frequency band impedance measurement approach for single-phase railway traction power system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(1): 244-253.
- [10] PAN P Y, HU H T, XIAO D H, et al. An improved controlled-frequency-band impedance measurement scheme for railway traction power system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(3): 2184-2195.
- [11] XIAO Donghua, HU Haitao, SONG Yitong, et al. Design of a controllable wideband voltage injection device for high-speed train impedance measurement [C]// 2022 IEEE 3rd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE), Nov. 3-5, 2022, Wuhan, China. IEEE, 2022: 1-6.
- [12] 张兵.高压宽频带阻抗测量方法与装备研制 [D].长沙:湖南大学, 2020.
- [13] 谢露.35 kV/1 MVA 宽频带阻抗特性测量技术与装备设计及实证 [D].长沙:湖南大学, 2020.
- [14] 伍文华.新能源发电接入弱电网的宽频带振荡机理及抑制方法研究 [D].长沙:湖南大学, 2019.
- [15] 杨凯,胡海涛,陈俊宇,等.电气化铁路再生制动能量利用系统保护方案研究 [J].中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9523-9535.
- [16] 韩正庆,刘淑萍,魏昕,等.同相供电设备保护方案研究 [J].铁道学报, 2013, 35(2): 21-25.
- [17] 张保会,尹项根.电力系统继电保护 [M].北京:中国电力出版社, 2010.

作者简介:

李小鹏(1987),男,博士,正高级工程师,研究方向为交直流混联电网控制保护技术;

曾奕(1977),女,硕士,高级工程师,研究方向为电力技术科研管理;

潘鹏宇(1993),男,博士,工程师,研究方向为新能源宽频阻抗测量技术;

冯昌隆(2001),男,硕士研究生,研究方向为阻抗测量技术;

姜晓锋(1989),男,博士,工程师,研究方向为新型电力系统宽频振荡分析与抑制;

胡海涛(1987),男,博士,教授,研究方向为电力系统电能质量与稳定性;

陶海东(1993),男,博士,副研究员,研究方向为牵引供电电能质量及稳定性。

(收稿日期:2024-03-26)