

500kV 变电站谐振的 PSCAD 仿真与谐波分析

侯晨伟¹, 刘 佳^{1,4}, 郑少林², 禹 江³, 霍利民¹

(1. 河北农业大学 机电工程学院, 河北 保定 071000; 2. 保定市智能电脑有限公司, 河北 保定 071000;
3. 中国地质大学长城学院, 河北 保定 071000; 4. 国家电网张家口市宣化区供电公司, 河北 张家口 075000)

摘要: 在 PSCAD 上对实际 500kV 变电站谐振进行了仿真, 并运用 MATLAB 软件对仿真得到的谐波数据进行了波形分析。模拟了不同风电厂功率及不同串联补偿装置数值和数量条件下变电站发生谐振的情况, 分析了仿真谐振波形和实际谐振波形, 找到谐振原因, 并据此提出了抑制谐振的方法, 并在实际变电站运行中得到验证。

关键词: PSCAD; 500kV 变电站; 谐振

中图分类号: TM771

文献标志码: A

PSCAD simulation and ferro-resonance analysis of 500kV transformer substation

HOU Chen-wei¹, LIU Jia^{1,4}, ZHENG Shao-lin², YU Jiang³, HUO Li-min¹

(1. Mechanical and Electrical College, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China;

2. Baoding Intelligent Computer Co., LTD, Baoding 071000, China;

3. China University of Geosciences Great Wall College, Baoding 071000, China;

4. State Grid Zhangjiakou Xuanhua District Power Supply Company, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: An actual 500kV substation ferro-resonance on PSCAD simulation is performed, and the harmonic analysis of the simulation is carried out by using MATLAB software. The different wind farm power and the different quantity and values of series compensation are simulated. The simulation waveform and the actual ferro-resonance waveform are analyzed, and the reasons of the ferro-resonance is found, according to which a method to suppress ferro-resonance is proposed. The method is validated in the actual substation operation.

Keywords: PSCAD; 500kV transformer substation; ferro-resonance

在现代电力系统中, 随着电力电子设备的广泛应用, 给电网带来了谐波问题, 并且谐波越来越成为影响电力系统安全稳定运行的一个重要因素^[1-2]。运行经验表明, 中性点接地和不接地系统中均频繁

地发生铁磁谐振, 谐振时出现的异常过电压和过电流引起绝缘闪络、避雷管爆炸、设备损坏, 严重时造成停电事故, 严重威胁电网安全运行^[3-4]。但是, 电网的复杂性和瞬时性, 使得引起谐振的原因查找困

收稿日期: 2016-02-21

基金项目: 国网冀北电力有限公司项目(8HE000M14001); 河北省保定市科技局项目(14ZG029)。

作者简介: 侯晨伟(1980-), 女, 河北石家庄人, 讲师, 研究方向为配电自动化。E-mail: hawei1015@163.com

通讯作者: 霍利民(1965-), 男, 河北安国人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统自动化技术。

E-mail: huolimin@126.com

难,因此很难针对谐振提出可靠有效的抑制方法。本研究应用的 PSCAD 软件是世界领先的电力系统仿真软件,用于电力系统分析和相关研究,该仿真软件提供一个完全模块化及可视化的通用电力仿真环境,具有很强的动态控制能力,丰富的数据输入输出工具和自定义模型数据库^[5]。

由于目前国内学者主要研究电磁式电压互感器谐振,对变电站谐振的研究较少,可参考的文献也很少。文献[7]搭建了一个变压器谐振仿真模型,通过断开某断路器导致线路对地电容通过变压器的一次电感进行放电导致变压器饱和而引发铁磁谐振,并针对仿真波形进行谐振检测方法研究,但所建模型和参数并非来自实际变电站。

本研究以某 500kV 变电站为研究对象,以实际变电站接线参数作为研究依据,首先在 PSCAD 电气仿真软件中建立了该 500kV 变电站的仿真模型,并模拟了不同风电厂功率及不同串联补偿装置数值和数量条件下,变电站产生谐振的情况;其次在 MATLAB 中运用希尔伯特-黄变换分析了仿真得到的谐振波形,并将仿真波形与实际波形的频谱分布进行了分析汇总,根据仿真情况分析产生了谐波的原因,据此提出了抑制谐波方法,并在变电站实际运行中得到了验证。

1 铁磁谐振产生的基本原理

当电网系统中等效电感 L 的伏安特性曲线与等效电容 C 的伏安特性相匹配,电路参数满足式(1)的条件时可能发生铁磁谐振,即:

$$\omega L = 1/\omega C \quad (1)$$

式中, ω 为谐振角频率。再由式(2)求得频率 f 。根据 f 的不同,可将谐振分为高频谐振、基频谐振和分频谐振。

$$f = \omega/2\pi \quad (2)$$

2 500 kV 变电站谐振的 PSCAD 仿真

自 2010 年起,某 500 kV 变电站 1、2 号主变曾多次发生谐振现象,其中较为严重的有 4~5 次。严重谐振时,主变出现很大的异响,并且产生连续不断的震动,站内录波装置频繁启动,波形发生畸变。抑制谐振首先需要找到引起谐振的原因,下面用 PSCAD 软件对该变电站进行仿真,通过分别改变风电厂功率以及串联补偿装置的数值和数量,找到产生谐振的原因,分析得到抑制谐振的方法,并经过变电站实际运行验证,证明抑制方法可靠有效。

2.1 仿真模型的建立

PSCAD 程序作为世界各国广泛使用的电磁暂态仿真软件,经过多年来的研究和发展,已经成为了既可以研究交直流电力系统问题,又能完成电力电子仿真及其非线性控制的多功能工具,因其大规模的计算容量、完整而准确的元件模型库、稳定高效率的计算内核、友好的界面和良好的开放性等优点,已经被世界各国的科研机构、高校和电气工程师所广泛采用。

在 PSCAD 中建立的该 500kV 变电站的谐振仿真模型如图 1。

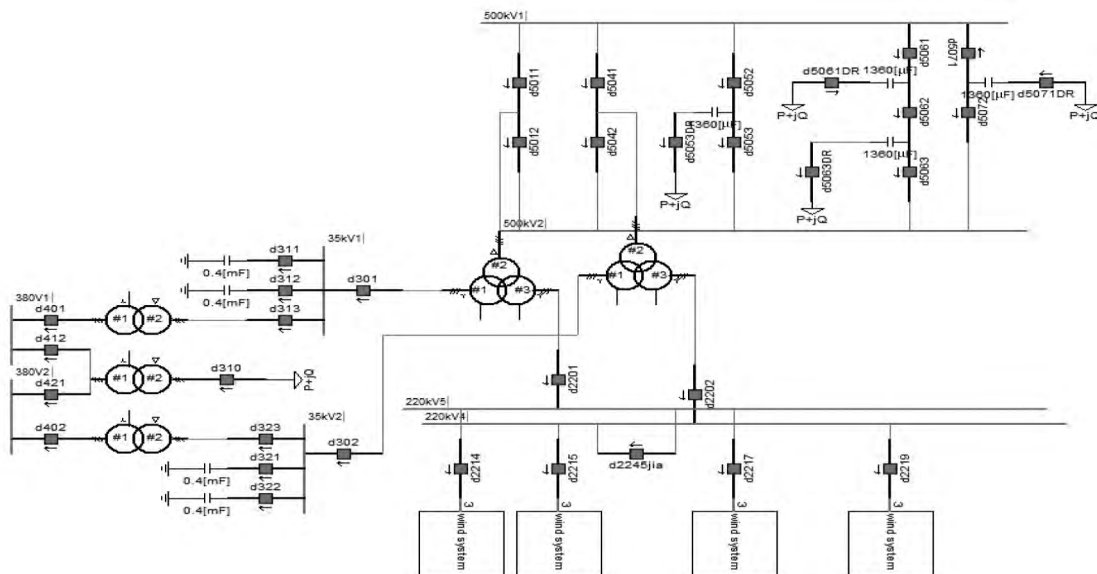


图 1 500kV 变电站的谐振仿真模型

Fig 1 Ferro-resonance simulation model of 500kV substation

图 1 中仅画出该 500 kV 变电站的主要一次系统接线。该变电站 500 kV 系统采用 3/2 接线方式,现运行 4 回出线,共运行 4 组串联补偿电容器;220 kV 系统采用双母双分段接线方式,现运行 4 回出线,用来连接 4 回风电厂进线;35 kV 系统采用单母线接线方式,共运行 4 组并联电容器。参数是采用该 500 kV 变电站的实际数据,主变压器由 3 个单相变压器组成,为简化模型,采用了三绕组变压器代替,实际单相变压器的型号 ODFSZ—250000/500,容量为 250 000/250 000/80 000 kVA,空载电流为 0.090%,空载损耗为 67.65 kW,负载损耗为 335.42 kW,接线方式采用 Y/Y/D。系统中串联补偿装置等效成电容器串联在线路中,并将风力发电厂模型单独搭建并联网,进一步提高了仿真的准确性,见图 2。

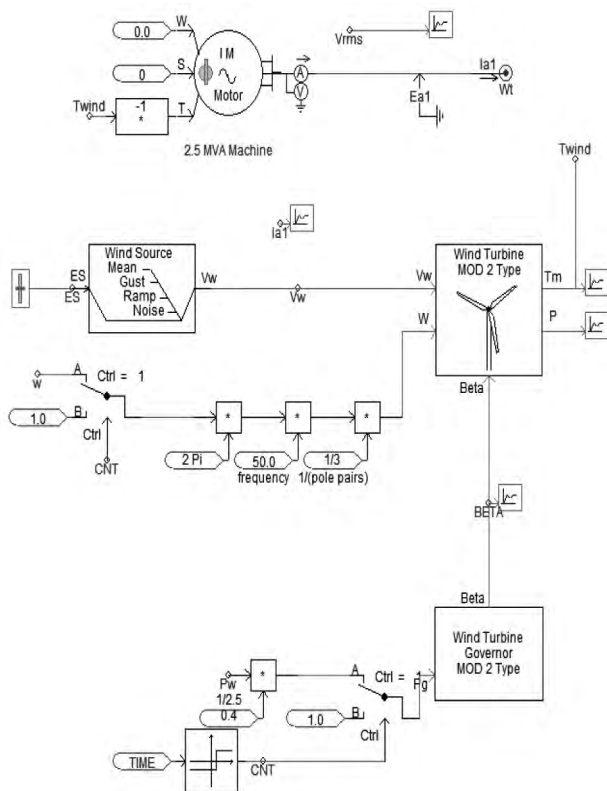


图 2 风力发电厂的仿真模型

Fig 2 The simulation model of wind farm

2.2 500kV 变电站发生谐振的仿真

在 PSCAD 中运行仿真模型:设在风电厂正常工作状态下,改变风力发电厂的发电功率,观测 2 号主变压器 500 kV 侧电流波形,直到谐振产生,电流发生明显畸变。电流明显畸变时的仿真波形如图 3 所示。

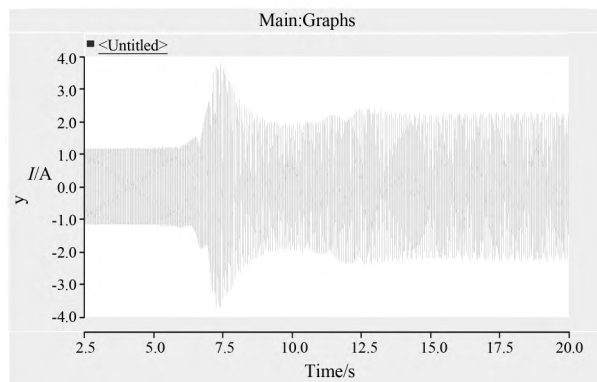


图 3 谐振发生时 2 号主变压器 500kV 侧电流波形图

Fig 3 500kV side current waveform of the 2nd main transformer when the ferro-resonance occurs

2.2.1 改变串联补偿装置数值及数量时的谐振分析

设定产生上述谐振时保持风力发电厂的输出额定功率值即额定电流不变,改变串联补偿装置的等效电容值以及接入系统的等效电容的数量,根据变电站实际运行情况,可以安装的数量为 3~4 个,且变换位置仅为供电侧的 2 个位置,分别编号为 1 号位置和 2 号位置,用电侧两个串联补偿装置设为 3 号位置和 4 号位置。通过检测 2 号主变压器 500 kV 侧的电流波形,并用 MATLAB 进行希尔伯特—黄变换来分析电流谐波波形,得到谐波中包含的各次谐波种类及幅值,图 4 是 MATLAB 软件进行希尔伯特—黄变换后的波形频谱分析。

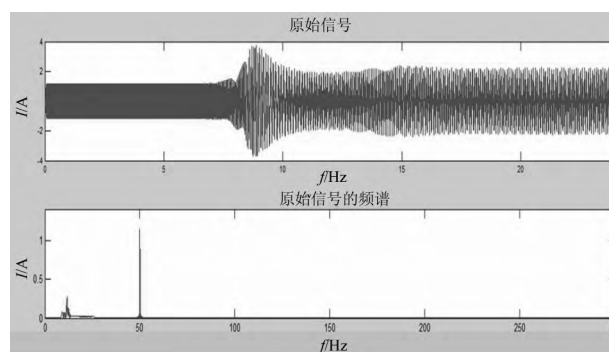


图 4 经过希尔伯特—黄变换得到的频率分布

Fig 4 The frequency distribution after the Hilbert-Huang Transform

通过分析改变串联补偿装置的等效电容值以及接入系统的等效电容的数量时谐波的区别,即谐波中包含的谐波次数以及谐波谐振程度来分析影响谐波发生的因素。具体检测条件及分析数值见表 1。

表 1 改变串联补偿装置数值及数量时谐波频谱汇总

Table 1 The ferro-resonance spectrum summary when the value and quantity of the series compensation device are changed

风电厂额定 功率/MVA Wind farm rated power	串联补偿 装置数量 Quantity of the series compensation device	串联补偿装置 等效电容数值/ μF Value of the series compensation device	串联补偿 装置安装位置 Series compensation device installation location	谐波主要分量 Harmonic main component		
				1/5	1/3	1
10000	4	200	1 2 3 4	0.093 5	1.321 0	1.956 2
		300	1 2 3 4	1.726 9	0.041 5	2.297 5
		400	1 2 3 4	1.104 7	0.032 4	1.692 4
		500	1 2 3 4	1.215 5	0.026 5	1.724 0
	3	200	1 3 4	2.8546×10^{-4}	3.7762×10^{-4}	1.411 4
		200	2 3 4	2.8465×10^{-4}	3.5925×10^{-4}	1.364 2
		300	1 3 4	2.9168×10^{-4}	3.8105×10^{-4}	1.419 3
		300	2 3 4	2.9400×10^{-4}	3.8265×10^{-4}	1.375 8
		400	1 3 4	2.8795×10^{-4}	3.7838×10^{-4}	1.425 6
		400	2 3 4	2.8789×10^{-4}	3.8395×10^{-4}	1.386 1
		500	1 3 4	2.8665×10^{-4}	3.8235×10^{-4}	1.429 9
		500	2 3 4	2.8215×10^{-4}	3.3886×10^{-4}	1.394 5

2.2.2 改变风电厂功率时的谐振分析 根据表 1 分析,设定保持串联补偿装置的等效电容数值为 200 μF ,共 4 个时,产生的谐波较明显,此时改变风力发电厂的额定输出电流,检测 2 号主变压器 500 kV 侧的电流波形,并用 MATLAB 进行希尔伯特—黄变换来分析谐波波形,得到谐波中包含的各次谐波种类及幅值,即谐波中包含的谐波次数以及谐波谐振程度来分析影响谐波发生的因素。具体检测及分析数值见表 2。

表 2 改变风电厂功率时谐波频谱汇总

Table 2 The ferro-resonance spectrum summary when the wind farm power is changed

风电厂额定功率 /MVA Wind farm rated power	谐波主要分量 Harmonic main component		
	1/5	1/3	1
3000	0.325 6	0.116 2	1.985 4
4000	0.241 8	0.254 4	1.195 7
5000	0.735 2	0.018 7	1.815 4
10 000	0.093 5	1.321 0	1.956 2
20 000	1.578 6	0.118 3	1.721 7
40 000	0.128 4	0.227 1	0.773 5

根据表 2 分析可知,风电厂功率有效值不同,产生的各次谐波含量不同,但都对分次谐波的形成有重要影响,在实际应用中可以考虑通过改变风电厂功率有效值来抑制分次谐波的产生。

2.2.3 改变串联补偿装置数值和风电厂功率时的谐振分析 由表 1 可知,当串联补偿装置的数量为 4 时,谐振情况明显,故设定串联补偿装置的数量为 4,同时改变串联补偿装置数值和风电厂功率,检测 2 号主变压器 500kV 侧的电流波形,并用 MAT-

LAB 进行希尔伯特—黄变换来分析谐波波形,得到谐波中包含的各次谐波种类及幅值。具体检测及分析数值见表 3。

表 3 改变串联补偿装置数值和风电厂功率时谐波频谱汇总

Table 3 The ferro-resonance spectrum summary when the value of the series compensation device and the wind farm power are changed

风电厂额定 功率/MVA Wind farm rated power	串联补偿装置 等效电容 数值/ μF Value of the series compensation device	谐波主要分量 Harmonic main component		
		1/5	1/3	1
3000	200	0.325 6	0.116 2	1.985 4
	400	0.098 4	0.864 1	1.976 5
5000	200	0.735 2	0.018 7	1.815 4
	400	0.981 4	0.248 1	1.854 9
10 000	200	0.093 5	1.321 0	1.956 2
	400	1.104 7	0.032 4	1.692 4
20 000	200	1.578 6	0.118 3	1.721 7
	400	1.412 4	0.351 2	1.854 1

根据表 3 分析可知,串联补偿装置数值和风电厂功率同时改变时,风电厂功率有效值不同,各次谐波的含量不同,但都对分次谐波的形成有重要影响。

2.3 仿真谐波及实际谐波数据分析对比

表 4 是该 500 kV 变电站谐振仿真数据及实际谐振数据的对比。经分析可知,仿真中出现较多、较明显的是分次谐波,其中以 1/3 次及 1/5 次谐波为主,与实际谐振波形中主要的谐波分量成分相同,数量级一致,证明仿真准确。据此分析产生谐振的原因是风力发电厂的输出功率有效值主要影响分次谐

波的产生。

表 4 500 kV 变电站谐振仿真数据及实际数据对比

Table 4 Contrast of 500 kV substation ferro-resonance

simulation data and real data

波形类型 The wave type	序号 Serial number	谐波主要分量 Harmonic main component		
		1/5	1/3	1
仿真波形	1	0.093 5	1.321 0	1.956 2
	2	1.726 9	0.041 5	2.297 5
	3	1.104 7	0.032 4	1.692 4
实际波形	1	0.024 5	0.001 6	0.200 0
	2	0.025 1	0.003 9	0.230 2
	3	0.351 4	0.002 1	0.319 2

2.4 谐振原因分析及抑制谐振的措施

由前面仿真可知,增加风电厂输出功率或改变串联补偿装置的数量和数值均可能激发主变压器谐振。一旦谐振发生,由公式(1)可知,只要改变参数 L 或 C 即可破坏引起谐振的条件,达到抑制谐振的作用。由表 2、表 3 和表 4 分析可知,改变串联补偿装置的数量、数值以及改变风电厂的输出功率都能达到抑制谐振的效果。

在实际运行现场,不便于改变串联补偿装置数值和风电厂的输出功率,相对容易进行串联补偿装置的投退操作。一旦谐振发生,变电站值班人员可通过退出一台串联补偿装置打断谐振的持续,抑制谐振的发展。经现场值班人员的实际操作,验证了此方法的有效性。

3 结论

用 PSCAD 软件仿真和 MATLAB 电流谐波分析可知,增加风电厂输出功率或改变串联补偿装置的数量和数值均可能激发主变压器分频谐振。分数次谐波种类与来自故障录波器的实际谐振数据相同,谐波含量占比数量级也相同,验证了仿真模型搭

建的准确性。

一旦谐振现象产生,可通过退出一组串联补偿装置抑制谐振发展,该方法得到了现场验证。

下一步需要做的工作是研制谐振实时检测装置,以便于变电站值班人员及时发现并采取谐振抑制措施。另外,还需从全系统的角度建立仿真模型,并对各种起振原因和谐振机理进行仿真分析。

参考文献:

- [1] 王家林,夏立,吴正国,等.采用改进 Prony 算法的电力系统故障暂态信号分析[J].电力自动化设备,2012,32(7):89-93.
- [2] 王正洪,朱正伟,蒋建明.希尔伯特-黄变换和小波变换用于谐波分析的比较研究[J].现代电子技术,2007(19):118-120.
- [3] 陈维贤.内部过电压基础[M].北京:电子工业出版社,1981.
- [4] 解广润.电力系统过电压[M].北京:水利电力出版社,1985.
- [5] 高阿龙.基于 PSCAD 的变速恒频双馈风力发电系统建模与控制研究[D].南京:河海大学,2007.
- [6] 许志龙,黄建华,王大忠.10kV 电网 TV 铁磁谐振过电压数字仿真及研究[J].电力自动化设备,2001,21(2):27-29.
- [7] 李旭洋,董新洲,薄志谦.电力变压器铁磁谐振检测方法研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(9):102-107.
- [8] 刘文泽,蔡泽祥,冯顺萍.变电站中电网谐波谐振分析与 EMTP 建模仿真[J].电力电容器与无功补偿,2009,30(2):17-20.

(编辑:张月清)