

The Analysis and Solutions for the Harmonic Amplification Occurred from Shunt Capacitor Devices in the 110 kV Substation

Mingxing Gu¹, Xi Zhang¹, Xiaolian Zhang²

¹Changshu Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Changshu Jiangsu

²School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing Jiangsu

Email: gumingx@126.com

Received: Nov. 27th, 2019; accepted: Dec. 17th, 2019; published: Dec. 24th, 2019

Abstract

Based on the analysis of the harmonic amplification phenomena, after the shunt capacitors of a 110 kV substation been turned into operation, the effect of harmonics amplification on the current power system is analyzed quantitatively. The paper investigates the rationality of capacitor reactance in series, and verifies with the field test data. The improved measures are put forward, which provide reference for how to select the reactance rate of shunt capacitor reasonably in practical application.

Keywords

Substation, Shunt Capacitor, Harmonic Amplification, Reactance Rate

一起110 kV变电站并联电容器装置谐波放大的分析与对策

顾明星¹, 张曦¹, 张小莲²

¹国网江苏省电力公司常熟市供电分公司, 江苏 常熟

²南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京

Email: gumingx@126.com

收稿日期: 2019年11月27日; 录用日期: 2019年12月17日; 发布日期: 2019年12月24日

摘要

本文通过对谐波放大现象的机理分析, 定量分析计算了某110 kV变电所并联电容器投入后对现有电网产

生的谐波放大影响, 对其电容器串联电抗率合理性进行探究, 并结合现场测试数据进行了验证。针对现有并联电容器装置串联电抗器配置不合理的问题提出了改进的措施, 为实际应用中如何合理选择电抗率提供了参考。

关键词

变电站, 并联电容器, 谐波放大, 电抗率

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在变电站中装设并联补偿电容器, 并进行分组投切, 已经成为变电站无功补偿、调整功率因数和调整电压的重要手段, 在电力系统中得到了广泛的应用[1]。但是, 在有谐波污染的情况下, 变电站的并联电容器补偿容量大小、串联电抗值等参数的选择, 是一个需要认真对待的问题。不同的电网谐波背景要求电容器装置采用不同的电抗率配置[2]。文献[3] [4] [5] [6] [7]指出电容器参数及电抗率选择不合理, 在某种系统运行方式和特定的谐波次数下, 可能发生谐波放大, 甚至发生并联谐振现象, 导致电压畸变的异常增大和污染扩大, 以及电力设备(包括电容器)因过电压、过电流而损坏, 有时甚至造成系统性恶性事故, 危及系统安全。

2. 某 110 kV 变电站谐波超标问题

2.1. 用户运行中的电能质量问题

2019年9月2日, 供电公司收到江苏省太湖地区水利工程管理所相关材料, 客户反映在投入 10 kV 高压电容补偿柜后有异常, 怀疑电网背景谐波注入影响。

该用户现有 3 台高压电机, 容量均为 500 kW, 另有 100 kVA、400 kVA 变压器各一台, 总协议容量为 2 MVA。由某 110 kV 变电站#1 主变供电, 挂接于 10 kV I 段母线 112 走马线 89#杆。

2.2. 变电站运行概况

2.2.1. 变电站主接线

某 110 kV 变电站, 双线双主变, 110 kV 侧采用内桥接线方式, 35 kV 采用单母分段带旁母接线方式, 10 kV 侧采用分列接线方式, 其一次主接线图见图 1。#1、#2 变压器型号为 SSZ11-80000/110, 高-低负载损耗为 304.2 kW, 高-低短路阻抗为 21.6%, 空载损耗为 39.64 kW, 空载电流 0.06%。主变低压侧出口电压 10.5 kV, 10 kV 母线最小短路容量 256 MVA。

2.2.2. 并联电容器配置

变电站配置 4 组电容器装置。10 kV I 母上配置 1K1 I 电容器组和 1K2 II 电容器组, 型号分别为 TBB10-4800/200-AY 和 TBB10-6000/200-AY, 额定电流分别为 252 A 和 315 A, 单台容量 200 kvar, 额定电压 $11/\sqrt{3}$ kV。1K1、1K2 所串电抗器参数一致, 型号为 CKK-10, 单相额定容量 10 kvar, 额定电流 400 A, 额定电感 0.2 mH。

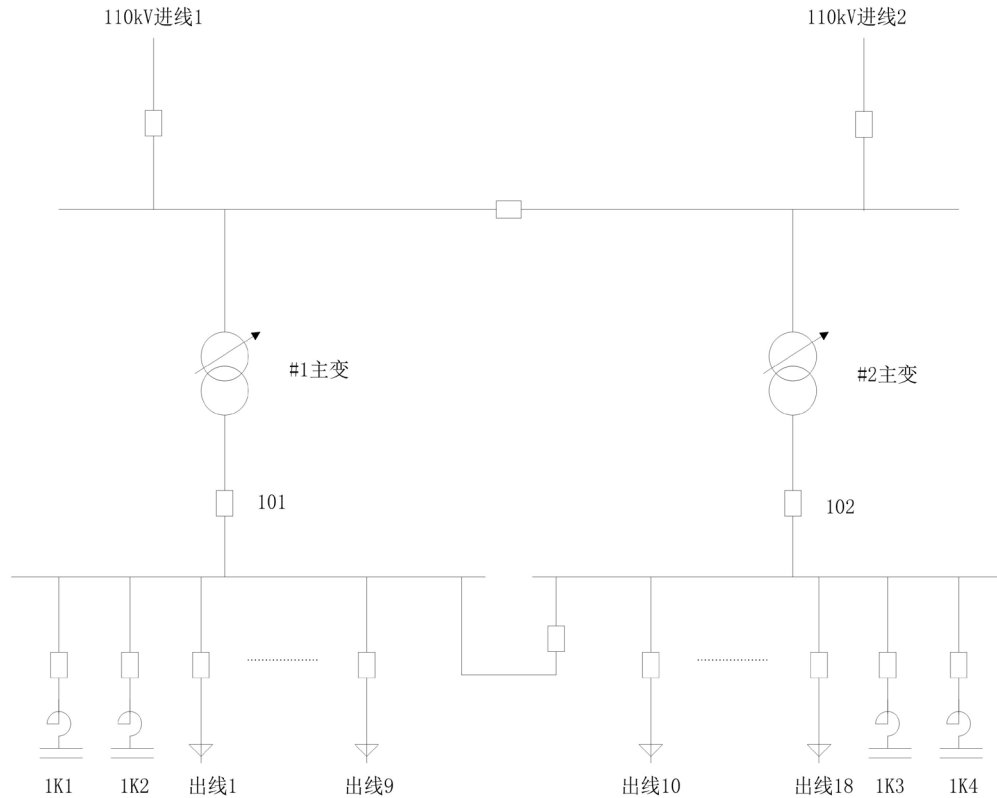


Figure 1. The primary wiring diagram of a 110 kV substation
图 1. 某 110 kV 变电站一次主接线图

2.3. 现场谐波测试情况

为此，根据电能质量技术监督规程[8]，采用美国电力士公司 DRANETZ PV440 电能质量分析仪对 101#1 主变开关开展了谐波测试工作，测量间隔时间及取值按 GB/T 14549 执行[9]，测量仪器和测量方法符合 GB/T 17626.7 的要求[10]。测试表明，1K1、1K2 电容器组均切除时，10 kV I 母电压总畸变率及各次特征谐波电压含有率均符合国家标准。当投入 1K1 电容器装置时，10 kV I 母电压畸变率增大约 1.8 倍；当投入 1K2 电容器装置时，10 kV I 母电压畸变率增大约 1.5 倍，电压总畸变率均超过了国家标准 4% 的要求。各相畸变率变化情况如表 1 所示。

Table 1. The table of distortion rate and main characteristics harmonic voltage containing rate on 10 kV I bus
表 1. 10 kV I 母总畸变率及主要特征谐波电压含有率情况表

谐波含有率(%)	电容器装置投入容量(Mvar)									国标限值
	0			4.8 (仅投 1K1)			6.0 (仅投 1K2)			
相序	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
基波电压(kV)	5.97	5.88	5.91	5.95	5.84	5.89	6.08	5.97	6.02	
3 次	1.84	1.83	1.74	1.8	1.94	1.75	1.86	1.89	1.75	3.2
5 次	3.09	3	3	6.17	6.33	6.21	6.10	6.28	6.17	3.2
7 次	1.06	0.96	1.2	1.22	1.48	1.18	1.97	2.04	2.22	3.2
THDu	3.82	3.74	3.75	6.56	6.8	6.58	6.39	6.56	6.45	4

1K1、1K2 电容器组均切除时, 101#1 主变开关侧 5 次谐波电流超过国标限值(查明为 115 大义线上华宇针织印染和昌盛印染 5 次谐波电流严重超标导致, 已请营销督促用户进行谐波治理)。当投入 1K1 或 1K2 电容器装置时, 101#1 主变开关侧 5 次、7 次谐波电流均出现放大现象。101#1 主变开关侧各相谐波电流变化情况如表 2 所示。

Table 2. The table of main characteristics harmonic current in 101#1 switch side of transformer
表 2. 101#1 主变开关侧主要特征谐波电流情况表

谐波电流(A)	电容器装置投入容量(Mvar)									国标限值
	0			4.8 (仅投 1K1)			6.0 (仅投 1K2)			
相序	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
基波电流	1147.46	1162.3	1168.75	1152.50	1156.36	1169.57	1043.04	1056.48	1064.7	
3	1.4	3.14	2.46	2.13	3.28	2.80	1.41	4.2	3.83	51.2
5	63.12	65.8	66.24	83.77	86.94	88.27	119.89	125	125.64	51.2
7	14.13	14.67	13.49	24.94	25.18	25.65	48.02	47.6	48.5	38.4
9	0.58	0.64	0.25	0.48	0.31	0.60	0.28	0.27	0.32	17.41

同时, 对 1K1、1K2 电容器回路进行了谐波测试, 其谐波电压和谐波电流情况如表 3、表 4 所示。

Table 3. The table of main characteristics harmonic voltage on the capacitor circuit
表 3. 电容器回路主要特征谐波电压情况表

谐波含有率(%)	1K1 支路			1K2 支路			国标限值
	A	B	C	A	B	C	
基波电压(kV)	6.07	5.95	5.98	6.18	6.06	6.11	
3 次	1.89	1.99	1.85	1.99	2.14	2.04	3.2
5 次	6.33	6.53	6.34	6.44	6.74	6.59	3.2
7 次	1.11	1.29	1	0.8	0.67	0.74	3.2
THDu	6.72	6.96	6.7	6.81	7.11	6.96	4

Table 4. The table of main characteristics harmonic current in the capacitor circuit
表 4. 电容器回路主要特征谐波电流情况表

谐波电流(A)	1K1 支路				1K2 支路			
	A	B	C	电容器谐波 电流放大倍数	A	B	C	电容器谐波 电流放大倍数
基波电流	240.08	241.3	240.96		305.05	305.59	306.43	
3	0.33	0.71	0.96	0.28	0.59	1.47	1.24	0.46
5	80.21	82.28	82.03	1.25	105.57	108.34	110.79	1.66
7	20.51	22.83	21.91	1.54	17.16	18.85	19.78	1.32
9	1.28	0.25	1.33	2.64	1.32	1.01	0.51	1.96

根据以上测试数据, 初步判断该变电站并联电容器串联电抗率选择不合理, 引起某一频率下谐波源注入系统和电容器组谐波电流的放大。

3. 谐波放大的成因分析

3.1. 谐波电流放大的基本原理

电容器并不产生谐波电流，但对系统的阻频特性影响很大，系统阻抗在某一频率下可能与并联补偿电容器发生谐振，从而引起谐波源注入系统和电容器组谐波的放大[11]。

供电系统的谐波源主要是电流源。电容器引起的谐波电流放大原理可用图 2 所示的简化接线图和等值电路图进行分析。图中， I_h 为谐波源的 h 次谐波电流， I_{sh} 为其注入到主系统的电流， I_{Ch} 为注入到电容器的电流。 Z_{sh} 为主系统的 h 次谐波阻抗(由于电抗远大于电阻，因此一般忽略电阻， $Z_{sh} \approx X_{sh}$)， X_{Ch} 、 X_{Kh} 分别为电容器、电抗器的 h 次谐波电抗。

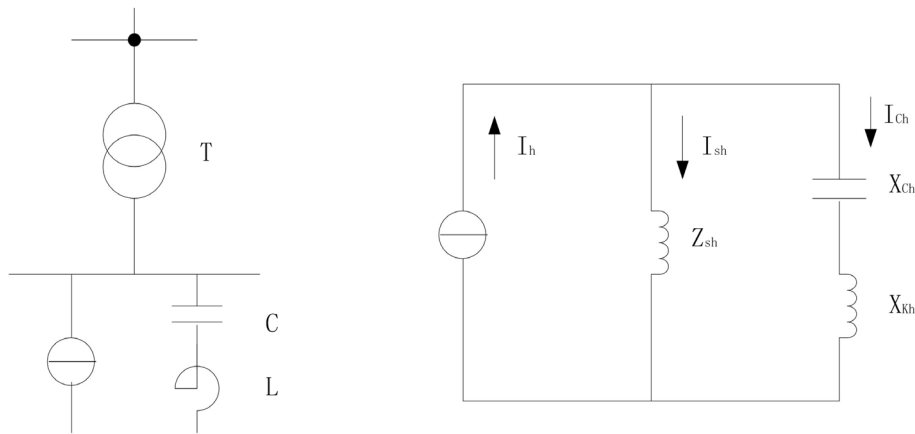


Figure 2. Simplified analysis diagram of power supply system
图 2. 系统简化分析图

设 $s = X_s/X_C$ ， $k = X_K/X_C$ 分别为以 X_C 为基值的系统电抗率和电抗器电抗率，则主系统和电容器的谐波电流可以表示为

$$I_{Ch} = \frac{X_{sh}}{X_{sh} + X_{Kh} - X_{Ch}} I_h = \frac{hX_s}{hX_s + hX_K - X_C/h} I_h = \frac{s}{s + k - 1/h^2} I_h \quad (1)$$

$$I_{sh} = \frac{X_{Kh} - X_{Ch}}{X_{sh} + X_{Kh} - X_{Ch}} I_h = \frac{hX_K - X_C/h}{hX_s + hX_K - X_C/h} I_h = \frac{k - 1/h^2}{s + k - 1/h^2} I_h \quad (2)$$

可以看出：

- 1) 在 $h_0 = 1/\sqrt{s+k}$ 时， $I_{Ch} = \infty$ ， $I_{sh} = \infty$ ，主系统和电容器的谐波电流均被无限放大(实际上由于电阻的存在， I_{Ch} 、 I_{sh} 是有限大值)，为谐振状态；
 - 2) 在 $h_k = 1/\sqrt{k}$ 时， $I_{Ch} = I_h$ ， $I_{sh} = 0$ ，电容器完全吸收谐波，为全滤波状态；
 - 3) 在 $h_1 = 1/\sqrt{2s+k}$ 时， $I_{Ch} = -I_h$ ， $I_{sh} = 2I_h$ ，为谐波严重放大的第一临界状态；
 - 4) 在 $h_2 = 1/\sqrt{s/2+k}$ 时， $I_{Ch} = 2I_h$ ， $I_{sh} = -I_h$ ，为谐波严重放大的第二临界状态；
- 谐波电流的典型状况如表 5 所示。

3.2. 参数计算和验证

根据变电站相关运行参数可知，系统相基波阻抗为：

$$X_s = \frac{U_c^2}{S_{oc}} = \frac{10.5^2}{256} = 0.43 \Omega$$

Table 5. Typical conditions of harmonic current amplification
表 5. 谐波电流放大典型状况

谐波次数	谐波放大状况	主系统电流	电容器电流
$1 \sim h_1$	轻度放大	[1,2]	[-1,0]
$h_1 \sim h_0$	严重放大	[2,+∞]	[-∞,-1]
h_0	谐振	∞	∞
$h_0 \sim h_2$	严重放大	[-∞,-1]	[2,+∞]
$h_2 \sim h_k$	轻度放大	[-1,0]	[1,2]
$\geq h_k$	分流	[0,1]	[0,1]

电容器组每相基波容抗:

$$X_{C1} = \frac{U^2 \times 1000}{S_{N1}/3} = \frac{(11/\sqrt{3})^2 \times 1000}{4800/3} = 25.21 \Omega$$

$$X_{C2} = \frac{U^2 \times 1000}{S_{N2}/3} = \frac{(11/\sqrt{3})^2 \times 1000}{6000/3} = 20.17 \Omega$$

电抗器每相基波感抗:

$$X_K = \frac{Q_K}{I_K^2} = \frac{10 \times 10^3}{400^2} = 0.063 \Omega$$

系统电抗率和电抗器电抗率分别为:

$$s_1 = X_s / X_{C1} = 0.43/25.21 = 1.7\%, \quad k_1 = X_K / X_{C1} = 0.063/25.21 = 0.25\%$$

$$s_2 = X_s / X_{C2} = 0.43/20.17 = 2.13\%, \quad k_2 = X_K / X_{C2} = 0.063/20.17 = 0.31\%$$

可以计算得到, 分别投入 1K1、1K2 电容器装置时谐波电流典型状况下对应的谐波次数如表 6 所示, 对应的主要特征谐波放大情况如表 7 所示。

Table 6. Typical conditions of harmonic current correspond to harmonic number
表 6. 谐波电流典型状况对应谐波次数

谐波次数	投 1K1	投 1K2
h_1	5.23	4.67
h_0	7.16	6.7
h_2	9.53	8.52
h_k	20	17.96

Table 7. The main characteristic harmonic amplification in theory

表 7. 理论计算下主要特征谐波放大情况

谐波次数	投 1K1			投 1K2		
	主系统电流放大倍数	电容器电流放大倍数	谐波放大状况	主系统电流放大倍数	电容器电流放大倍数	谐波放大状况
3	1.19	-0.19	轻度放大	1.25	-0.25	轻度放大
5	1.83	-0.83	轻度放大	2.37	-1.37	严重放大
7	19.72	-18.72	严重放大	-4.34	5.34	严重放大
9	-1.38	2.38	严重放大	-0.77	1.77	轻度放大

实际测试下主要特征谐波放大情况如表 8 所示。由此可见,理论计算的结果和工程实际测试基本一致(由于电阻的存在,理论上谐波放大倍数大于实际谐波放大倍数),投入 1K1 或 1K2 电容器装置时,对系统 3、5、7、9 次主要特征谐波均有不同程度的放大。

Table 8. The main characteristic harmonic amplification under actual test

表 8. 实际测试下主要特征谐波放大情况

谐波次数	投 1K1			投 1K2		
	主系统电流放大倍数	电容器电流放大倍数	谐波放大状况	主系统电流放大倍数	电容器电流放大倍数	谐波放大状况
3	1.24	-0.28	轻度放大	1.30	-0.46	轻度放大
5	1.33	-1.25	放大	1.90	-1.66	放大
7	1.79	-1.54	放大	-3.41	1.32	严重放大
9	-1.24	2.64	严重放大	-0.73	1.96	轻度放大

4. 对策与措施

变电站电容器装置电抗率的配置应从电网的背景谐波状况出发,充分收集相关资料,根据电网的发展规划,了解系统谐波水平、谐波源特性,综合考虑系统谐波阻抗特性、系统主接线及设备参数、无功补偿要求等,进行电容器装置及电抗器参数的工程设计[12][13][14][15]。并在变电站设备投运后组织现场实测,进行必要的校验计算,对于电抗率选择不合理的电容器装置必须及时更换匹配的串联电抗器。

4.1. 并联电容器装置串联电抗率的调整

根据该变电站负荷谐波特性,为避免 3 次谐振及 5 次以上主要谐波的放大,电容器串联电抗率应满足

$$h'_0 = \frac{1}{\sqrt{s+k'}} > 3, h'_k = \frac{1}{\sqrt{k'}} < 5 \quad (3)$$

由此可得 $0.04 < k'_1 < 0.09$, $0.04 < k'_2 < 0.09$, 考虑到 6%电抗率对 3 次谐波的放大作用比 5%大,且容量大、经济性差,因此建议将串联电抗率优化调整为 5%。此时,分别投入 1K1、1K2 电容器装置时谐波电流典型状况下对应的谐波次数如表 9 所示。对 5 次及以上谐波,电容器支路的综合谐波阻抗呈感性,避免了谐振及谐波放大的可能。

Table 9. When $k = 5\%$, typical conditions of harmonic current correspond to harmonic number

表 9. $k = 5\%$ 时,谐波电流典型状况对应谐波次数

谐波次数	投 1K1	投 1K2
h'_1	3.45	3.29
h'_0	3.86	3.75
h'_2	4.13	4.06
h'_k	4.47	4.47

4.2. 谐波电压的放大校验

实际串联电抗率 k 的取值应满足投入电容器时对系统谐波电压放大率不大于 1.5 倍(如投运后谐波电压低于标准的 50%,且电容器组不发生谐波过电压,则放大率可适当放宽到 2.0 倍)的要求,进行相关校

验计算。

由于谐波源为电流源，谐波电压放大率与谐波电流放大率相等，故由式(2)整理推导可得 10 kV 母线谐波电压放大率为

$$|F_{sh}| = \left| \frac{kh^2 - 1}{h^2(s+k) - 1} \right| \quad (4)$$

将串联电抗率 $k = 5\%$ 和电网相关参数代入公式(4)，计算分别投入 1K1 电容器和 1K2 电容器时，主要特征谐波所对应的谐波电压放大倍数如表 10 所示。

Table 10. The check table of harmonic voltage amplification times on 10 kV bus
表 10. 10 kV 母线谐波电压放大倍数校核表

谐波次数	谐波电压放大倍数	
	投 1K1	投 1K2
3	1.39	1.54
5	0.37	0.32
7	0.64	0.58
9	0.69	0.64

由计算结果可以看出，选择 5% 的串联电抗器对 5 次谐波电压放大率仅为 0.37 和 0.32，满足要求。

4.3. 电容器过电流与过电压校验

由式(1)可推导得电容器谐波放大倍数

$$|F_{Ch}| = \left| \frac{h^2 s}{h^2(s+k) - 1} \right| \quad (5)$$

电容器谐波电流

$$I_{Ch} = |F_{Ch}| I_h$$

电容器谐波电压

$$U_{Ch} = I_{Ch} X_C / h$$

电容器过电流校验

$$\sqrt{I_{C1}^2 + \sum I_{Ch}^2} \leq 1.15 I_{CN} \quad (6)$$

电容器过电压校验

$$U_{C1} + \sum U_{Ch} \leq 1.2 U_{CN} \quad (7)$$

以上公式适合谐波源负荷和电容器组同在变压器的低压侧。当电容器安装在变压器低压侧，而谐波来自变压器高压侧时，用 $(t+k)$ 取代以上各式中的 k 值(t 为变压器基波电抗与电容器基波电抗之比)。

选择 5% 的串联电抗器时，电容器基波电压

$$U_{C1} = U_{C2} = \frac{1.05 U_c}{\sqrt{3S(1-k)}} = \frac{1.05 \times 10.5 \times 1000}{\sqrt{3} \times 1 \times (1-0.05)} = 6700 \text{ V}$$

由 $X_{C1} = 25.21 \Omega$ ， $X_{C2} = 20.17 \Omega$ ，可得 1K1、1K2 电容器基波电流分别为：

$$I_{C1} = \frac{U_{C1}}{X_{C1}} = \frac{6700}{25.21} = 266 \text{ A}, \quad I_{C2} = \frac{U_{C2}}{X_{C2}} = \frac{6700}{20.17} = 332 \text{ A}$$

流经电容器支路的各次主要特征谐波分量电流和电压值如表 11 所示。

Table 11. The main characteristics harmonic component of the capacitor circuit

表 11. 电容器支路主要特征谐波分量

谐波次数	投 1K1		投 1K2	
	电容器电流(A)	电容器电压(V)	电容器电流(A)	电容器电压(V)
基波	266	6700	332	6700
3	0.90	7.56	1.25	8.39
5	40.96	206.52	44.27	178.58
7	5.14	18.52	5.90	17.00
9	0.15	0.43	0.18	0.40

由 2.2.2 节变电站电容器配置可知 $I_{CN1} = 252 \text{ A}$, $I_{CN2} = 315 \text{ A}$, $U_{CN1} = U_{CN2} = 11/\sqrt{3}$ 。因此, $\sqrt{I_{C1}^2 + \sum I_{Ch}^2} = 269.19 \text{ A} = 1.07I_{CN1}$, $\sqrt{I_{C2}^2 + \sum I_{Ch}^2} = 334.99 \text{ A} = 1.06I_{CN2}$, 其值均小于 $1.15I_{CN}$, 满足要求; $U_{C1} + \sum U_{Ch} = 6933 \text{ V} = 1.09U_{CN1}$, $U_{C2} + \sum U_{Ch} = 6904 \text{ V} = 1.09U_{CN2}$, 其值均小于 $1.2U_{CN}$, 满足要求。

5. 结语

本文就客户反映的电能质量问题, 对其上级变电站背景谐波情况进行了现场测试, 实测和理论分析表明, 由于变电站 10 kV 并联电容器组串联电抗器参数配置不合理, 导致电容器投入后产生了谐波放大。根据系统谐波水平和系统谐波阻抗特性, 对该变电站的串联电抗器参数设定提出了改进措施。经计算论证, 将电容器串联电抗器更换为 5% 的电抗率, 可有效抑制谐波放大。

参考文献

- [1] 姜松青. 变电站用高压并联电容器成套装置[J]. 山东工业技术, 2017(5): 281.
- [2] 国家电网公司. 并联电容器装置技术及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [3] 胡淳, 杨猛, 吕文韬. 某变电站 20kV 并联电容器投运后谐波测试分析[J]. 机电信息, 2017(12): 1-2.
- [4] 江卫中, 徐青龙, 翟国柱, 等. 110kV 变电站并联电容器装置谐波谐振分析与对策[J]. 供用电, 2017, 34(11): 73-77.
- [5] 沈东方, 张华. 10kV 无功自动补偿装置的谐波放大分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(1): 12-15.
- [6] 郭昆丽, 田海霞, 王建波, 等. 某变电站 10kV 并联电容器故障分析及对策[J]. 广东电力, 2017, 30(3): 58-63.
- [7] 曾海涛, 欧雄坚, 胡少强. 并联电容器谐波放大引起的 10kV 线路断路器跳闸事故的分析[J]. 机电工程技术, 2015, 44(1): 108-111.
- [8] 国家能源局. 电能质量技术监督规程: DL/T 1053-2017[S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [9] 国家技术监督局. 电能质量, 公用电网谐波: GB/T 14549-1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局. 电磁兼容, 试验和测量技术, 供电系统及所连设备谐波、间谐波的测量和测量仪器导则: GB/T 17626.7-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [11] 肖湘宁等. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [12] 中国电力企业联合会. 并联电容器装置设计规范: GB 50227-2017[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2017.
- [13] 周胜军, 林海雪. 并联电容器装置参数的工程选择计算[J]. 供用电, 2009, 26(4): 9-14, 51.

- [14] 陶梅, 江钧祥. 串联电抗器及其电抗率的选取[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(3): 58-61.
- [15] 邓朴, 刘晓波, 皮显松, 等. 电容器串联电抗消除谐振的最大值最小优化[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 71-78.