

中小型水电站谐波污染的特点及抑制措施

马士英¹, 粟时平¹, 李和平²

(1. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410076;
2. 湖南水利水电开发集团有限公司, 湖南 长沙 410015)

摘要: 在分析高耗能企业对水电站谐波污染现状的基础上, 通过理论计算和实际测量, 确认谐波电流频谱丰富、谐波电流大而电压畸变较小是水电站谐波污染的主要特点, 并探讨了抑制谐波污染的方法措施。通过某水电站谐波治理的实例, 论证了利用单调谐滤波器和高通滤波器构成的滤波装置是当前技术条件下水电站谐波治理的有效措施。

关键词: 水电站; 谐波污染; 滤波器

中图分类号: TN 713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)08-0039-04

为充分利用水力资源, 各地的中小型水电站纷纷自筹资金或以低电价吸引外部资金建设以金属冶炼和化工为主的高耗能企业, 以消耗丰水季节的剩余电能。由于对这些高耗能企业生产过程中所产生的谐波及其危害的认识不足, 兴办的高耗能企业的电力负荷产生的谐波污染, 已严重影响到水电站的安全运行。分析调查中小型水电站谐波污染现状及特点, 寻找解决谐波污染问题的对策, 已成为中小型水电站的当务之急。

1 谐波污染现状与特点

对部分水电站谐波污染情况的调查表明, 几乎所有办有高耗能企业的中小型水电站都不同程度地存在谐波污染问题。有些水电站的谐波污染还十分严重, 已多次发生由谐波引起的继电保护、自动装置误动作和发电设备损坏事故。调查还发现, 水电站的谐波污染有下面的一些共同特点。

a. 谐波电流较大, 而电压波形的畸变并不十分严重。图 1 所示为湖南南津渡水电站的电气主接线, 表 1 为委托中国电力科学研究院对该水电站进行的谐波电流测试结果。测试条件为 1 号发电机运行, 经 1 号主变压器升压向外送电; 3 号发电机运行, 经 2 号主变压器向外送电; 1 号、2 号主变压器 110 kV 侧并列运行, 经 2 条输电线路向系统送电, 35 kV 侧分列运行, 水电站工业小区负荷由 2 号主变压器 35 kV 侧供电; 系统注入水电站的谐波电流未测量。测得的工业小区 35 kV 变电站 35 kV 母线和 1 号、2 号发电机母线电压畸变率分别为 4.22 %, 2.39 %, 3.38 %。

造成这种情况的原因是, 作为恒流源的谐波电源, 由于其与发电机之间的谐波阻抗远小于系统的谐波阻抗, 根据分流原理可知谐波源的谐波电流将主要流

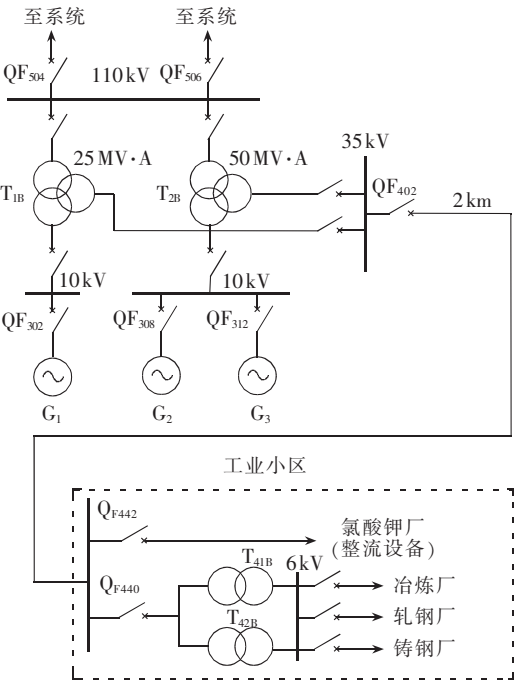


图 1 南津渡水电站一次系统图

Fig.1 The primary system of Nanjindu hydraulic power station

入发电机。

例如对于图 2 所示的水电站简化谐波等值电路, 如谐波源的 n 次谐波电流为 I_n , 谐波源与公共连接点之间的谐波电抗为 nX_1 , 发电机电势与公共连接点之间的谐波电抗为 nX_{G1} , 系统与公共连接点之间的谐波电抗为 nX_{S1} , 则流入发电机的 n 次谐波电流 I_{Gn} 和注入系统的 n 次谐波电流 I_{Sn} 分别为

$$I_{Gn} = \frac{nX_{S1}}{nX_{S1} + nX_{G1}} I_n = \frac{X_{S1}}{X_{S1} + X_{G1}} I_n$$
$$I_{Sn} = \frac{nX_{G1}}{nX_{S1} + nX_{G1}} I_n = \frac{X_{G1}}{X_{S1} + X_{G1}} I_n$$
$$\frac{I_{Gn}}{I_{Sn}} = \frac{X_{S1}}{X_{G1}}$$

表 1 南津渡水电站谐波电流测试结果

Tab.1 The harmonic currents measured in Nanjindu hydraulic power station

n	I _Z /A	I _G /A		n	I _Z /A	I _G /A	
		G ₁	G ₃			G ₁	G ₃
2	5.14	1.94	2.91	14	1.14	0.97	0.97
3	4.00	7.77	6.80	15	1.14	0.97	0.97
4	3.05	0.97	0.97	16	1.50	0.97	0.97
5	60.62	13.60	5.83	17	7.78	0.97	2.91
6	1.14	0.97	0.97	18	2.86	0.97	0.97
7	31.75	0.97	11.65	19	8.55	0.97	0.97
8	1.72	0.97	0.97	20	3.23	0.97	0.97
9	1.14	0.97	0.97	21	3.60	0.97	0.97
10	1.14	0.97	0.97	22	3.41	0.97	0.97
11	15.41	0.97	5.83	23	4.37	0.97	0.97
12	0.77	0.97	0.97	24	0.95	0.97	0.97
13	10.09	0.97	3.88	25	1.50	0.97	0.97

注: n 为谐波次数; I_Z 为归算到发电机电压的工业小区谐波电流; I_G 为发电机谐波电流; G_1, G_3 指 1 号、3 号发电机。

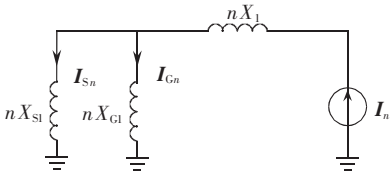


图 2 水电站简化谐波等值电路图

Fig.2 The simplified harmonic equivalent circuit of hydraulic power station

公共连接点的 n 次谐波电压为

$$U_n = \frac{nX_{G1}nX_{S1}}{nX_{G1} + nX_{S1}} I_n = n \frac{X_{G1}X_{S1}}{X_{G1} + X_{S1}} I_n$$

在 $X_{G1} \ll X_{S1}$ 的情况下,谐波电流将大部分流入发电机,使发电机的谐波电流较大,而谐波电压较小。

b. 谐波频谱丰富,且含有较大的次谐波和间谐波。由于水电站所办的高耗能企业大多为金属冶炼企业和化工企业,其负荷主要是电弧炉和整流装置,由于电弧炉在金属冶炼开始阶段时负荷的不稳定性、随机性和不对称性,使其负荷电流中不仅含有各种频率的高次谐波,并且含有次谐波和间谐波^[1]。

2 解决谐波污染问题的对策^[1-5]

对于中、小型水电站高耗能企业所造成的高次谐波污染问题,可以采取以下措施解决。

a. 适当选择用电设备型式,减少谐波电流的产生。例如在选择整流装置时,应注意适当选择整流器相数。因为整流装置所产生的特征谐波电流次数 n 与脉动数 p 有关($n=kp \pm 1, k=2, 3, \dots$),当脉动数增多时,产生的特征谐波电流次数增高,而谐波电流与谐波次数成反比,通过增加脉动次数就可以使一系列次数较低、成分较大的谐波得到消除,减小谐波源产生的谐波电流。但脉动次数越多,整流装置投资越大,从技术、经济上考虑,以采用 12 脉动整流器(六相全波整流器)较为合理。

b. 在谐波源处装设滤波装置,就近吸收谐波源

所产生的谐波电流。滤波装置分“无源型”和“有源型”两种。“有源型”滤波装置是在基于坐标变换原理的瞬时无功功率和瞬时无功电流理论上发展起来的一种新型滤波装置,根据与补偿对象连接方式的不同分为并联型和串联型两种,实际应用中多为并联型,通过向电网注入补偿谐波电流,来抵消负荷产生的谐波电流,达到滤波的目的。同无源型滤波装置相比,有源型滤波装置具有滤波效果好,容易实现协调滤波、无功补偿和调压要求,材料消耗少,体积小等优点,是一种具有应用前途的滤波装置。但目前由于其价格昂贵,容量较小及其他技术方面的原因,我国尚未在工程上得到广泛应用。目前得到广泛应用的是“无源型”滤波装置,“无源型”滤波装置由电容器、电抗器(常用空心的)和电阻器适当组合而成,运行中它和谐波源并联,不仅可滤除高次谐波电流,还可以兼顾无功补偿和调压的需要。无源滤波器的形式很多,用的较多的无源滤波器有单调谐滤波器和高通滤波器两种。单调谐滤波器利用 R, L, C 电路串联谐振原理构成,其原理接线图和阻抗频率特性如图 3(a)(b)所示。图中 $|Z_n|$ 为单调谐滤波器的 n 次谐波阻抗的幅值, $n=f_n/f_1$ 为谐波次数。单调谐滤波器用于滤除某一特定频率处的谐波电流,其所滤除的谐波电流的频率 f_n 由其参数决定, $f_n = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ 。当需要滤除多种频率的谐波时,必须采用多个不同谐振频率的谐振电路,这种滤波器滤波效果好,但所用设备多、投资大、占地面积大。

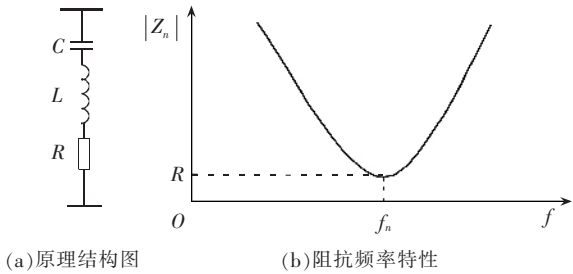


图 3 单调谐滤波器

Fig.3 Single-tune passive filter

高通滤波器通常采用图 4(a)所示主电路,用于滤除截止频率 f_0 ($f_0=1/(2\pi RC)$) 以上的高次谐波电流,高通滤波器阻抗频率特性如图 4(b)所示。图

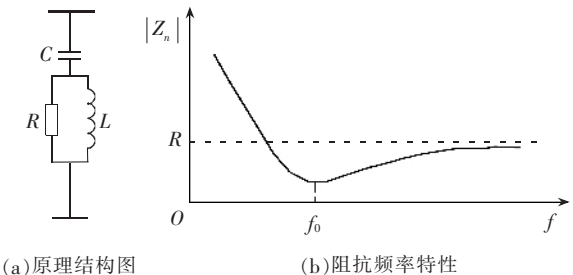


图 4 高通滤波器

Fig.4 High pass filter

中 $|Z_n|$ 为高通滤波器谐波阻抗 $Z_n=1/(jn2\pi f_1C)+(1/R+1/(jn2\pi f_1L))^{-1}$ 的幅值。高通滤波器所用设备少、投资小、占地面积小、通频带宽,适宜滤除频谱连续的谐波电流,但其滤波效果不如单调谐滤波器。

中小型水电站装设的无源滤波装置通常采用图 5 的接线方式,其中单调谐滤波器组数和谐振频率以及高通滤波器的截止频率应根据谐波源谐波电流的特点选择,对于以整流装置为主要负荷的水电站,如整流装置为六脉动整流,因其特征谐波为 $6p\pm 1$ 次,在无其他谐波源的情况下,装设 5、7 次单调谐滤波器 and 一组高通滤波器,一般就可使谐波得到抑制。

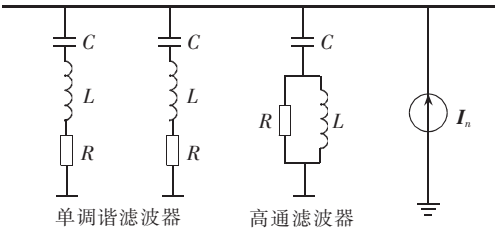


图 5 水电站无源滤波装置接线图
Fig.5 Passive filter device structure in hydraulic power station

当水电站负荷为电弧炉等具有丰富低次谐波且频谱连续的非线性用电设备时,单调谐滤波器应从滤除二次谐波开始。至于高通滤波器的截止频率一般情况下应选择比最高次单调谐滤波器次数至少高一次,以免它过多地分流单调谐滤波器的谐波。特殊情况下(如实例所示)高通滤波器的截止频率也可低于最低次单调谐滤波器的次数。

同时注意到中小型水电站谐波源距离发电机电气距离很短,为提高滤波效果,在不过多增加滤波装置有功功率损耗的情况下,单调谐滤波电路中的电阻应取较低的数值。

3 实例

图 6 是中国电力科学研究院输配电工程中心为湖南省南津渡水电站设计安装的滤波装置的电气主接线图^①,图中元件参数为 $C_1=5.84\ \mu\text{F}$, $R_1=5\ 000\ \Omega$, $L_1=199.24\ \text{mH}$, $C_2=5.84\ \mu\text{F}$, $R_2=4.5\ \Omega$ (电抗器绕组电阻), $L_2=71.73\ \text{mH}$, $C_3=3.9\ \mu\text{F}$, $R_3=4.83\ \Omega$ (电抗器绕

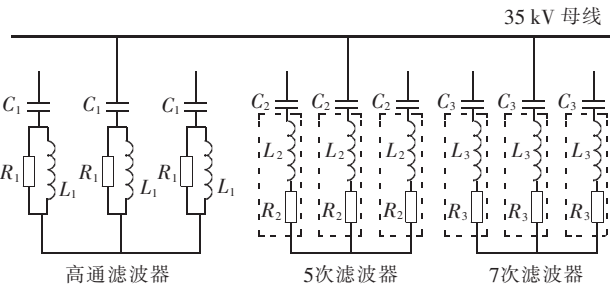


图 6 南津渡水电站无源滤波装置接线图
Fig.6 Passive filter device structure in Nanjindu hydraulic power station

组电阻), $L_3=54.89\ \text{mH}$, 由一组截止频率为 3 次的二阶减幅型高通滤波器和两组谐振频率为 5 次、7 次的单调谐滤波器组成。高通滤波器除可以对 3 次谐波电流滤波外,对于 3 次以上的高次谐波、“次谐波”、“间谐波”也有一定的滤除作用。5 次、7 次单调谐滤波器则是根据南津渡水电站 5 次、7 次谐波电流含有量最大,为提高 5 次、7 次谐波电流的滤波效果而设置的。针对测试期间的水电站运行方式,中国电力科学研究院利用专门的计算机仿真计算程序,对滤波装置投入后水电站的谐波电流、35 kV 母线电压畸变率、1 号和 3 号发电机母线电压畸变率进行了仿真计算,计算表明 35 kV 变电所母线、1 号发电机母线和 3 号发电机母线电压谐波畸变率分别从 4.81 %、2.39 %、3.38 % 降至 1.64 %、1.68 % 和 1.33 %。谐波电流情况则如表 2 所示。

表 2 装设滤波装置后南津渡水电站
谐波电流仿真计算结果

Tab.2 The simulative harmonic currents of Nanjindu hydraulic power station with filter device

n	I_z/A	I_G/A		n	I_z/A	I_G/A	
		G_1	G_3			G_1	G_3
2	0.55	0.20	0.49	14	0.15	0.05	0.26
3	0.29	0.09	0.50	15	0.07	0.02	0.14
4	0.66	0.22	0.69	16	0.07	0.02	0.13
5	0.84	0.28	1.51	17	0.62	0.21	1.13
6	0.44	0.15	0.81	18	0.29	0.09	0.50
7	0.37	0.12	0.64	19	0.37	0.12	0.64
8	0.18	0.06	0.34	20	0.37	0.12	0.65
9	0.22	0.07	0.39	21	0.26	0.08	0.45
10	0.15	0.05	0.28	22	0.29	0.09	0.52
11	1.25	0.41	2.22	23	0.55	0.19	1.01
12	0.07	0.02	0.11	24	0.33	0.10	0.57
13	0.62	0.21	1.13	25	0.18	0.06	0.33

注:各符号意义同表 1。

装置投入使用后的运行情况也表明滤波效果很好,注入发电机和系统的谐波电流和各母线电压畸变率都得到了有效抑制。

4 结语

中小型水电站为利用丰水季节剩余电能所兴办的高耗能企业中大量采用整流装置和电弧炉等非线性负荷造成谐波污染,由于谐波源距离发电机的电气距离很短,所以水电站的谐波污染具有发电机谐波电流大,而谐波电压并不很高和谐波频谱十分丰富的特点。谐波污染对水电厂的影响主要是谐波电流引起的附加发热对发电机和变压器的影响以及负序性谐波电流对反应负序分量的继电保护和自动装置的影响。适当选择用电设备的型式(主要指整流装置的脉动数)和根据水电站的实际情况(水电站与系统的联系和谐波源的特点等),选择适当的滤波装置和设备参数可有效解决中小型水电站谐波污染问题。

① 中国电力科学研究院输配电工程中心. 南津渡水电站 35 kV 滤波装置系统设计方案. 2002.

参考文献:

(责任编辑:戴绪云)

- [1] 吴竟昌. 供电系统谐波[M]. 北京:中国电力出版社, 1998.
- [2] WAKILEH G J. 电力系统谐波——基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐 政译. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [3] 林海雪, 孙树勤. 电网中的谐波[M]. 北京:中国电力出版社, 1998.
- [4] 王兆安, 杨 君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社, 1998.
- [5] 宋文南. 电力系统谐波分析[M]. 北京:中国电力出版社, 1995.

作者简介:

马士英(1955-), 男, 河北安平人, 副教授, 主要从事电力系统运行分析与控制的研究(E-mail: mashiying195557@sina.com);

粟时平(1963-), 男, 湖南邵阳人, 副教授, 博士, 主要从事无功补偿、电工理论与智能控制的研究;

李和平(1959-), 男, 湖南常德人, 高级工程师, 主要从事水电站运行与控制的研究。

Characteristics of harmonic pollution in medium and small hydraulic power stations and suppression methods

MA Shi-ying¹, SU Shi-ping¹, LI He-ping²

(1. Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China;

2. Group of Hunan Water Resource and Hydropower Development, Changsha 410015, China)

Abstract: Based on the harmonic pollution analysis of hydraulic power station caused by huge energy-consumed company, through theoretic computing and factual measuring, its characteristics are found: abundant harmonic current spectrum, large harmonic current and small voltage distortion. The suppression methods are also discussed. The practice in a certain hydraulic power station verifies that the use of device consisting of single-tune passive filter and high-pass filter is an effective way.

Key words: hydraulic power station; harmonic pollution; filter

(上接第38页 continued from page 38)

- [7] 汤振飞, 于尔铿, 唐国庆. 电力市场输电阻塞管理[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(2): 19-22.
- TANG Zhen-fei, YU Er-keng, TANG Guo-qing. Congestion management and pricing in competitive power market[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(2): 19-22.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

李立颖(1981-), 女, 贵州桐梓人, 硕士研究生, 主要从事

电力系统优化运行、电力市场等研究工作(E-mail: susu liying@hotmail.com);

张喜铭(1980-), 男, 吉林敦化人, 硕士研究生, 主要从事电力市场及其软件开发研究工作;

彭建春(1964-), 男, 湖南常德人, 副院长, 教授, 博士研究生导师, 主要从事电力市场、电力系统优化运行、规划及其应用软件的开发等研究工作;

陶 洁(1978-), 女, 湖北荆州人, 助理工程师, 主要从事电力系统分析、电网运行方面的研究工作。

Demand-side energy purchase strategy based on transmission congestion risk

LI Li-ying¹, ZHANG Xi-ming², PENG Jian-chun³, TAO Jie⁴

(1. Design Institute at Guangzhou Metro Corporation, Guangzhou 510010, China;

2. China Southern Power Grid Foshan Nanhai Power Supplying Corporation, Nanhai 528000, China;

3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082,

China; 4. Hunan Electric Power Survey & Design Institute, Changsha 410082, China)

Abstract: The limitation of transmission network makes all traders in electricity market confront with the risk caused by transmission congestion. The congestion risk is analyzed from demand side. Both generation companies and consumers should reckon the congestion risk in bidding or purchasing strategies. A purchase decision model at demand side is constructed, with which consumers may draw up their energy purchase plans in terms of profit expectations and profit standard deviations in different purchase conditions. An analytic example is put forward. The voluntary adjusting of power demands by consumers will mitigate the transmission congestion virtually.

Key words: electricity market; risk analysis; profit expectation; profit standard deviation; energy purchase strategy; demand side management