串连电源技术在锻造中的应用

——浅谈电源谐波、功率因数和电效率

应达工业（上海）有限公司　唐永君

1. 概述

由于感应加热具有加热速度快、在物料内部发热和热效率高、温度控制精度高、加热均匀、产品质量好、加热氧化皮少、模具费用和营运成本低、环境污染少以及可控性好、易于实现自动化等一系列优点，近年来在中国锻造行业的应用越来越普及。但随着社会工业现代化的发展，如近期的高速铁路的建设、国家对整个电网的公共安全、品质以及能耗提出的越来越严格的标准，也给中频加热电源提出了更高的要求。下面，我们将重点介绍一下中频电源的谐波、功率因数以及效率问题。

感应加热技术是利用电磁感应原理，通过交变电流在工件中产生涡流来加热工件的。感应加热电源是将工频电源转换为感应加热所要求频率的单相电源的变频器。电源通常包括整流器、逆变器以及加热炉体部分。电源的整流部分是将输入的工频交流电转换为直流，而逆变器则是将直流电转换为加热所需频率的单相交流电。电炉部分是连接逆变电路的负载线圈电路。根据电感性线圈并联或串连电容的形式可分为两种基本的电源形式，即电流反馈型并联逆变和电压反馈型串连逆变，由此产生谐振来加热工件。

2. 功率因数和效率

国内锻造中频电源，通常采用如图 1 所示的电流反馈型并联逆变电路。调节功率时，一般需要调节整流晶闸管的控制角，非线性负荷增加，这时会产生大量的不同于工频的正弦波，对电网的谐波将加剧，使电力系统波形严重畸变。无功功率增加、功率因数将下降，单位能耗将自然增高。我公司的电源采用的是图 2 所示的电压反馈型串联逆变电路，整流模块采用二极管，是通过逆变调节触发频率来调节输出功率（两者成指数关系），不需调节整流晶闸管，整流输出波形好。因此，对电网谐波污染少，其功率因数不受整流的影响，功率因数高而恒定，10%～100%调节范围都能保持在 0.92～0.95。如图 3 所示，电源转换效率可以高达 95%，因此电效率高；整流控制简单，启动容易，晶闸管等功率元件故障损耗低。

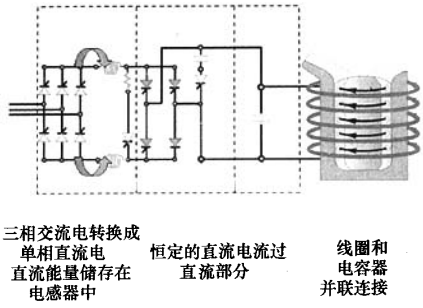

图 1　电流反馈型并联逆变电路

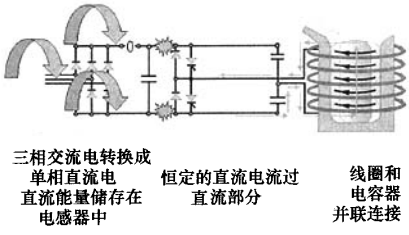

图 2　电压反馈型串联逆变电路

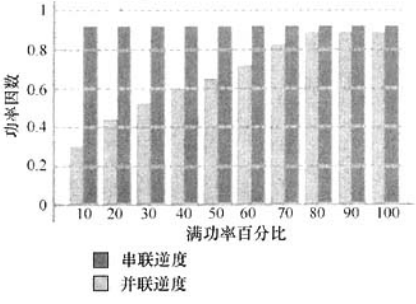

图 3　两种方式功率因数比较

3. 谐波

电力系统中有非线性（时变或时不变）负载时，即使电源都以工频 50Hz 供电。当工频电压或电流作用于非线性负载时，就会产生不同于工频的其他频率的正弦电压或电流。这些不同于工频频率的正弦电压或电流，用富氏级数展开，就是人们所说的电力谐波，谐波是按谐波电流值占满负载电流的百分比表示（见表 1），总的电力谐波是根据各次谐波按下式求和。各种整流器都会对输入交流电网产生非正弦波电流，即对电网形成有害的电流畸变谐波。

表 1　谐波电流值占满负载电流的百分比

谐波次数	相数/脉冲		
	3/6	6/12	12/24
5	17.5	2	2
7	11	1.5	1.5
11	4.5	4.5	1
13	3	3	0.75
17	1.5	0.2	0.2
19	1.25	0.15	0.15

$$THD = P \times \sqrt{\Sigma R^2 K n^2}$$

式中　THD——总畸变；

P——电源功率；

X——系统阻抗；

K_n——n 次谐波电流占满负载电源的百分比；

n——谐波闪数。

谐波的危害主要表现为：引起谐振，造成危险的过电压或过电流；产生谐波损耗，使用电设备效率降低；加速电气设备绝缘老化，从而缩短使用寿命；使一些电气设备或仪器运转不正常或不能正确操作；干扰通信系统，甚至损坏通信设备。国家对电源功率因数和谐波都有相关定性和定量的规定要求。国家公用电网谐波电压（相电压）限值见表 2。国家规定，公共连接点的全部用户向该点注入的谐波电流分量（方均根值）不应超过表 3 所示的允许值。

对于谐波或功率因数不达标的电力部门，国家通常会罚，并和要求整改治理。谐波治理就是在谐波源处安装滤波器，就近吸收谐波源产生的谐波电流。费用较高，而且效果有时也不理想，其原理也是将这些产生的谐波消耗吸收掉，但同时也大量地消耗了电能。我公司锻造电源采用串连电源、二极管整流的方式，从而从源头减少谐波。功率不大的电源，通常采用 3 相 6 脉冲，以我公司 1000kW 的 3 相 6 脉锻造中频电源做测试分析，具体参见表 4 中的国家标准和我们的设备在各电网电压的各次谐波数据。功率越大，谐波干扰越严重，通常功率大于 1500kW 的设备就需要考虑 6 相 12 脉冲，以进一步减少谐波的干扰。

表 2　公用电网谐波电压（相电压）

电网标称电压/kV	电压总谐波畸变率（%）	各次谐波电压含有率（%）	
		奇　次	偶　次
0.38	5.0	4.0	2.0
6	4.0	3.2	1.6
10			
35	3.0	2.4	1.2
66			
110	2.0	1.6	0.8

表 3　注入公共连接点的谐波电流允许值

标准电压/kV	基准短路容量/MVA	谐波次数及谐波电流允许值/A																							
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0.38	10	78	62	39	62	26	44	19	21	16	28	13	24	11	12	9.7	18	8.6	16	7.8	8.9	7.1	14	6.5	12
6	100	43	34	21	34	14	24	11	11	8.5	16	7.1	13	6.1	6.8	5.3	10	4.7	9.0	4.3	4.9	3.9	7.4	3.6	6.8
10	100	26	20	13	20	8.5	15	6.4	6.8	5.1	9.3	4.3	7.9	3.7	4.1	3.2	6.0	2.8	5.4	2.6	2.9	2.3	4.5	2.1	4.1
35	250	15	12	7.7	12	5.1	8.8	3.8	4.1	3.1	5.6	2.6	4.7	2.2	2.5	1.9	3.6	1.7	3.2	1.5	1.8	1.4	2.7	1.3	2.5
66	500	16	13	8.1	13	5.4	9.3	4.1	4.3	3.3	5.9	2.7	5.0	2.3	2.6	2.0	3.8	1.8	3.4	1.6	1.9	1.5	2.8	1.4	2.6
110	750	12	9.6	6.0	9.6	4.0	6.8	3.0	3.2	2.4	4.3	2.0	3.7	1.7	1.9	1.5	2.8	1.3	2.5	1.2	1.4	1.1	2.1	1.0	1.9

表 4　应达集团谐波测试报告

	基准短路容量/MVA	电网标准电压/kV	设置额定功率		谐波电流计算值/A			
			/kV	套	5	7	11	13
中国国家标准	100	10			20	15	9.3	7.9
			1000	1	10.91	6.86	2.81	1.81
			1000	2	15.43	9.70	3.97	2.56
			1000	3	18.90	11.88	4.87	3.13
			1000	4	21.82	13.72	5.62	3.62
中国国家标准	250	30			12	8.8	5.6	4.7
			1000	1	3.12	1.96	0.80	0.52
			1000	2	4.41	2.77	1.13	0.74
			1000	3	5.40	3.39	1.39	0.90
			1000	4	6.24	3.92	1.60	1.04

注：1. 在电网标准电压 10kV 条件下，中频感应电源 1000kW 全功率送电时，同一供电回路只能连接三套设备，不会超出电能总量公共电网谐波标准之允许值。

2. 4 套以上设备应改为电网电压 35kV 供电，将可达谐波标准要求，谨供参考。

美国应达工业集团是全球规模最大的感应电源及相关感应加热设备制造商，在很多国家的市场占有率高达 70%以上，全球共有十几家锻造感应加热工厂。应达锻造技术团队旗下聚集了世界上一些在锻造感应加热领域最著名的品牌，集团全球累计销售已近 5000 套锻造感应加热设备，在中国累计销售途逾 100 台。其中，锻造行业近 100 台感应加热设备，如常州龙城精锻 5 套、山东金马集团 2 套，太平洋精密锻造 3 套、江苏飞船齿轮 2 套、湖州哈特贝 2 套、上海交大中京、白城中一精锻等。

目前，在上海和无锡设立了两家独资工厂，员工共有 280 名，可以更好地为中国客户提供世界一流技术的产品和本地化的价格和服务。热

（20070729）

（上接第 73 页）

4. 工作原理

模具工作前，上模处于压力机滑块的上死点位置，将工件放在退料板上，并与下凸模的模腔正确接触。

模具工作时，上模下行，上凸模 12 首先接触工件 13，同时与下凸模 14 一起将工件 13 紧紧抱住。随着上模的继续下行，在氮气缸 5 的作用下，上下凸模对工件的抱紧力也越来越大，与此同时，冲头 8 和切边凹模 11 也随上模下行。当冲头 8 和切边凹模 11 对工件陆续进行冲孔和切边时，上下凸模已将工件紧紧抱住。因此，保证了切边冲孔时工件的变形最小，也起到了对工件的整形作用。

切边时，切边凹模 11 将飞边与退料板 15 一起压下至下死点位置。以我厂为一汽解放公司生产的 6DEL1 型连杆为例，未使用复合切边模具时，连杆的直线度、平面度达 1.0～1.2mm，而使用了复合切边模后，连杆的直线度、平面度仅为 0.3～0.4mm，效果非常明显。

模具回程时，在弹簧 16 的作用下，退料板 15 将飞边从下凸模 14 中退出。操作者用手钳将飞边与工件一起从模具中水平端出，翻转 180°后，将工件扣在传送带上，飞边放在废料箱中，至此完成整个切边工序。

随着压力机滑块的继续上移，氮气缸的压力变小，上下凸模对工件的抱紧力由大变小、由小变无，至上死点位置时上下凸模之间的距离最大，为下一个循环做好了准备。热

（20070830）

（上接第 74 页）

对 20mm × 2000mm 卷板机来说，L = 180m，R = 348mm。图 a 为待整圆前筒体的形状。图 b 为展开料卷制划线的分配情况，卷制时先按图卷制出中部的设计曲率 R 区间。然后卷制近端头的 r 区间，至于 r 多大合适，可用估计的方法使两端对口为止（见图 c）。最后在卷板机上点焊固定。

R 区卷制长度，可从图 d 中分析，焊接成后放入卷板机整圆，尽量多次压下成形，先正转后反转，消除残余应力，改善金属内部结构。

通过卷板机卷出小半径使之对口焊接后再整圆，此方法成形后焊接从卷板机抽出，然后最后统一找圆，比其他方法可节省工时 40%。热

（20070612）