

# Study on the Field Test Method of the Operating Losses for High-Power Rectified System

Shengju Zheng<sup>1</sup>, Zhiwen Zhang<sup>2</sup>, Yanmei Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup>China ENFI Engineering Corporation, Beijing

<sup>2</sup>Hunan University, Changsha

Email: [zhengsj@enfi.com.cn](mailto:zhengsj@enfi.com.cn), [hdzzw@126.com](mailto:hdzzw@126.com), [531085913@qq.com](mailto:531085913@qq.com)

Received: Jun. 27<sup>th</sup>, 2014; revised: Jul. 10<sup>th</sup>, 2014; accepted: Jul. 16<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors 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

---

## Abstract

A field test method of the operating losses for high-power rectified system is proposed. This method is suitable for not only conventional rectified unit, but also new rectified unit which is composed of the new rectified transformer, the inductive filter and the rectifier. The topology of the new rectified system and its principle are described. On-site measurement method of operation loss for each component is given. The method uses many high-precision & portable power quality analyzer to synchronously measure the various components loss of the high-power rectified unit. The overall efficiency of the unit and the efficiency of the various components can be calculated. A detailed field test result for an industrial site engineering prototype is given to verify the correctness of the test method.

## Keywords

Rectified System, New Transformer, Inductive Filter, Operating Loss, Synchronously Measurement

---

# 大功率整流系统运行损耗现场测试方法研究

郑圣聚<sup>1</sup>, 张志文<sup>2</sup>, 李艳美<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国恩菲工程技术有限公司, 北京

<sup>2</sup>湖南大学, 长沙

Email: [zhengsj@enfi.com.cn](mailto:zhengsj@enfi.com.cn), [hdzzw@126.com](mailto:hdzzw@126.com), [531085913@qq.com](mailto:531085913@qq.com)

收稿日期：2014年6月27日；修回日期：2014年7月10日；录用日期：2014年7月16日

## 摘要

提出一种大功率整流系统运行损耗的现场测试方法。该方法既适合常规整流机组，也适合由新型整流变压器、感应滤波器和整流器构成的新型整流机组。介绍了新型整流系统的拓扑结构及其工作原理，给出了现场测量各个部件运行损耗的方法。该方法利用多台高精度便携式电能质量分析仪对大功率整流机组的各部件损耗进行同步测量，由此得到机组总效率和各部件效率。对某工业现场的工程样机进行了详细的现场测试，验证了测试方法的正确性。

## 关键词

整流系统，新型变压器，感应滤波器，运行损耗，同步测试

## 1. 引言

大功率整流机组在电化学、冶金及轨道交通等领域取得了广泛应用。随着社会对节能减排和清洁能源呼声的日益高涨，这些高能耗领域的企业对整流机组的效率和电能质量也更加关切，加上考虑到经济运行，企业对整流机组及各部件的损耗及效率和电能质量测试需求也日趋强烈[1] [2]。

本文介绍了基于新型整流变压器的大功率整流系统，包括其拓扑结构及工作原理。结合某应用于实际工业系统的大功率整流系统分析了测量和计算各部件损耗的方法。通过详细的现场测试，得出了新型大功率整流系统的损耗，验证了测量方法的正确性，并间接证明了应用新型感应滤波技术的大功率整流系统在工程上的优越性。

## 2. 新型大功率整流系统拓扑

新型大功率整流系统拓扑图如图1所示[3]-[5]。主要由三大部件组成：(1) 含有载调压的新型整流变压器及其滤波装置；(2) 三相桥式晶闸管可控整流器；(3) 具有低电压、大电流特性的直流工业负荷。阀侧产生的特征次谐波将流过变压器绕组后传入网侧，安装的无源滤波器可实现特征次谐波的抑制，同时补偿了系统消耗的无功功率，从而保证电网的电能质量良好。

### 2.1. 三绕组整流变压器

大功率整流系统中所用变压器为新型整流变压器，新型整流变压器与传统变压器相比，增加了一个滤波绕组。其主要应用了谐波屏蔽的原理，在最接近谐波源的地方增加滤波绕组用以吸收谐波，以此提高整流系统的功率因数。

12脉波整流系统中的整流变压器为三绕组变压器，低压两个绕组分别为星形和三角形连接，各带一套三相桥晶闸管整流，构成12脉波直流输出。其绕组连接方式如图2所示。

由多绕组变压器原理可以得到如式(1)所示的电压传递方程[6]。

式(1)中，阀侧绕组各参数均折算到网侧绕组，对于3绕组变压器，绕组阻抗分为两个绕组之间的短路阻抗(如网侧绕组与阀侧负载绕组的短路阻抗 $Z_{n21}$ )及单各绕组具有漏抗特性的等值阻抗(网侧绕组的等值短路阻抗 $Z_{2n}$ )，后者可以由短路阻抗间接计算得出，即： $Z_{2h} = (Z_{h21} + Z_{h23} - Z'_{h13})/2$ ；滤波装置的阻抗为 $Z_{\mu n}$ (A相滤波支路)。这里，当 $n=1$ 时表示基波情况，当 $n$ 为大于1的整数时，表示谐波情况。

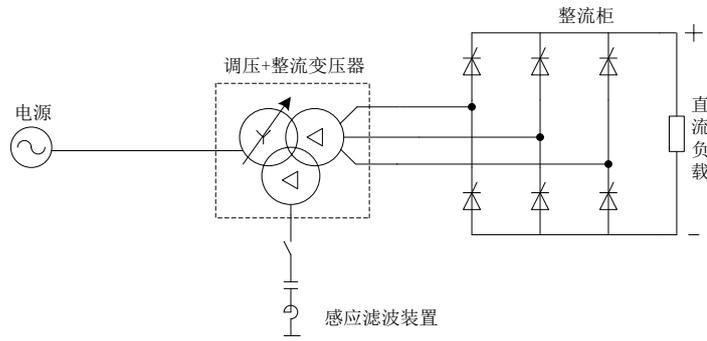


Figure 1. Topology of the new high-power rectified system

图 1. 新型大功率整流系统拓扑图

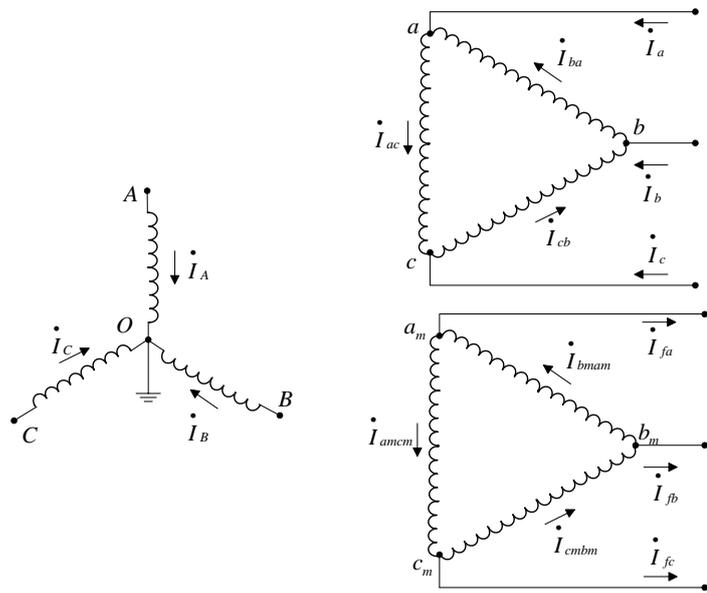


Figure 2. Winding connection of the new rectified transformer

图 2. 新型整流变压器绕组连接方式

$$\begin{cases} U_{ac-n} - \frac{N_2}{N_1} U_{A-n} = -\frac{N_1}{N_2} I_{A-n} Z_{n21} - \frac{N_3}{N_2} I_{amcm-n} Z_{2n} \\ U_{ac-n} - \frac{N_2}{N_3} U_{amcm-n} = -\frac{N_3}{N_2} I_{amcm-n} Z_{n23} - \frac{N_1}{N_2} I_{A-n} Z_{2n} \\ U_{ba-n} - \frac{N_2}{N_1} U_{B-n} = -\frac{N_1}{N_2} I_{B-n} Z_{n21} - \frac{N_3}{N_2} I_{bmam-n} Z_{2n} \\ U_{ba-n} - \frac{N_2}{N_3} U_{bmam-n} = -\frac{N_3}{N_2} I_{bmam-n} Z_{n23} - \frac{N_1}{N_2} I_{B-n} Z_{2n} \\ U_{cb-n} - \frac{N_2}{N_1} U_{C-n} = -\frac{N_1}{N_2} I_{C-n} Z_{n21} - \frac{N_3}{N_2} I_{cmbm-n} Z_{2n} \\ U_{cb-n} - \frac{N_2}{N_3} U_{cmbm-n} = -\frac{N_3}{N_2} I_{cmbm-n} Z_{n23} - \frac{N_1}{N_2} I_{C-n} Z_{2n} \end{cases} \quad (1)$$

同理，忽略励磁电流，可列出图 2 所示新型整流变压器的三相绕组磁势平衡方程为：

$$\begin{cases} I_{A-n} + \frac{N_2}{N_1} I_{ac-n} + \frac{N_3}{N_1} I_{amcm-n} = 0 \\ I_{B-n} + \frac{N_2}{N_1} I_{ba-n} + \frac{N_3}{N_1} I_{bmam-n} = 0 \\ I_{C-n} + \frac{N_2}{N_1} I_{cb-n} + \frac{N_3}{N_1} I_{cmbm-n} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

根据基尔霍夫电流定律(KCL), 可得到新型整流变压器各绕组的电流方程组如下:

$$\begin{cases} I_{ac-n} = I_{ba-n} + I_{a-n} \\ I_{ba-n} = I_{cb-n} + I_{b-n} \\ I_{cb-n} = I_{ac-n} + I_{c-n} \\ I_{amcm-n} = I_{bmam-n} - I_{fa-n} \\ I_{bmam-n} = I_{cmbm-n} - I_{fb-n} \\ I_{cmbm-n} = I_{amcm-n} - I_{fc-n} \\ I_{ac-n} + I_{ba-n} + I_{cb-n} = 0 \\ I_{amcm-n} + I_{bmam-n} + I_{cmbm-n} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

根据基尔霍夫电压定律(KVL), 可得到新型整流变压器滤波绕组及其配套滤波装置的电压方程组如下:

$$\begin{cases} U_{bmam-n} = -U_{am-g-n} + U_{bm-g-n} \\ U_{amcm-n} = -U_{cm-g-n} + U_{am-g-n} \\ U_{cmbm-n} = -U_{bm-g-n} + U_{cm-g-n} \\ U_{am-g-n} = I_{fa} Z_{fan} \\ U_{bm-g-n} = I_{fb} Z_{fbn} \\ U_{cm-g-n} = I_{fc} Z_{fcn} \end{cases} \quad (4)$$

式(3)、(4)共同表征了新型整流变压器在基波与谐波情况下的基本数学模型, 基于此, 可进一步研究谐波传递数学模型。

将式(3)、(4)代入式(1)可得:

$$\begin{cases} U_{ac-n} = -\frac{N_1}{N_2} I_{A-n} Z_{n21} - \frac{N_3}{N_2} I_{amcm-n} Z_{2n} \\ U_{ac-n} = -\frac{N_3}{N_2} I_{amcm-n} Z_{n23} - \frac{N_1}{N_2} I_{A-n} Z_{2n} + \frac{N_2}{N_3} (I_{fa-n} Z_{fan} - I_{fc-n} Z_{fcn}) \\ U_{ba-n} = -\frac{N_1}{N_2} I_{B-n} Z_{n21} - \frac{N_3}{N_2} I_{bmam-n} Z_{2n} \\ U_{ba-n} = -\frac{N_3}{N_2} I_{bmam-n} Z_{n23} - \frac{N_1}{N_2} I_{B-n} Z_{2n} + \frac{N_2}{N_3} (-I_{fa-n} Z_{fan} + I_{fb-n} Z_{fbn}) \\ U_{cb-n} = -\frac{N_1}{N_2} I_{C-n} Z_{n21} - \frac{N_3}{N_2} I_{cmbm-n} Z_{2n} \\ U_{cb-n} = -\frac{N_3}{N_2} I_{cmbm-n} Z_{n23} - \frac{N_1}{N_2} I_{C-n} Z_{2n} + \frac{N_2}{N_3} (-I_{fb-n} Z_{fbn} + I_{fc-n} Z_{fcn}) \end{cases} \quad (5)$$

对上式进行整理可得:

$$\begin{cases} \frac{N_1}{N_2} I_{A-n} (Z_{n21} - Z_{2n}) + \frac{N_3}{N_2} I_{amcm-n} (Z_{2n} - Z_{n23}) + \frac{N_2}{N_3} (I_{fa-n} Z_{fan} - I_{fc-n} Z_{fcn}) = 0 \\ \frac{N_1}{N_2} I_{B-n} (Z_{n21} - Z_{2n}) + \frac{N_3}{N_2} I_{bmam-n} (Z_{2n} - Z_{n23}) + \frac{N_2}{N_3} (-I_{fa-n} Z_{fan} + I_{fb-n} Z_{fbn}) = 0 \\ \frac{N_1}{N_2} I_{C-n} (Z_{n21} - Z_{2n}) + \frac{N_3}{N_2} I_{cmbm-n} (Z_{2n} - Z_{n23}) + \frac{N_2}{N_3} (-I_{fb-n} Z_{fbn} + I_{fc-n} Z_{fcn}) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

结合式(3)，并假定滤波支路3相参数平衡，即  $Z_{fan} = Z_{fbn} = Z_{fcn} = Z_{fn}$ ，对上式进行整理可得：

$$\begin{cases} \frac{N_2}{N_1} I_{A-n} Z_{1n} - \frac{N_2}{N_3} I_{amcm-n} (Z_{3n} + 3Z_{fn}) = 0 \\ \frac{N_2}{N_1} I_{B-n} Z_{1n} - \frac{N_2}{N_3} I_{bmam-n} (Z_{3n} + 3Z_{fn}) = 0 \\ \frac{N_2}{N_1} I_{C-n} Z_{1n} - \frac{N_2}{N_3} I_{cmbm-n} (Z_{3n} + 3Z_{fn}) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

将式(2)代入上式可得：

$$\begin{cases} I_{A-n} = -\frac{\frac{N_2}{N_3} (Z_{3n} + 3Z_{fn})}{\frac{N_3}{N_1} Z_{1n} + \frac{N_1}{N_3} (Z_{3n} + 3Z_{fn})} I_{ac-n} \\ I_{B-n} = -\frac{\frac{N_2}{N_3} (Z_{3n} + 3Z_{fn})}{\frac{N_3}{N_1} Z_{1n} + \frac{N_1}{N_3} (Z_{3n} + 3Z_{fn})} I_{ba-n} \\ I_{C-n} = -\frac{\frac{N_2}{N_3} (Z_{3n} + 3Z_{fn})}{\frac{N_3}{N_1} Z_{1n} + \frac{N_1}{N_3} (Z_{3n} + 3Z_{fn})} I_{cb-n} \end{cases} \quad (8)$$

根据阀侧绕组电流与负载电流的关系，对上式整理，可得从二次负载侧谐波电流传递到新型整流变压器网侧绕组的谐波电流传递数学表达式：

$$\begin{bmatrix} I_{A-n} \\ I_{B-n} \\ I_{C-n} \end{bmatrix} = -\frac{\frac{N_2}{N_3} (Z_{3n} + 3Z_{fn})}{\frac{N_3}{N_1} Z_{1n} + \frac{N_1}{N_3} (Z_{3n} + 3Z_{fn})} \times \frac{1}{1 - e^{j-120^\circ}} \begin{bmatrix} I_{ac-n} \\ I_{ba-n} \\ I_{cb-n} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)表征了新型整流变压器网侧绕组的谐波电流与二次负载侧谐波电流的对应关系。当滤波支路的阻抗接近于零，即全调谐情况下  $Z_{3n} \rightarrow 0$ 、 $Z_{fn} \rightarrow 0$ ，此时必然满足  $Z_{1n} \gg Z_{3n} + 3Z_{fn}$ ，从而可得感应滤波方式下，谐波电流基本上被抑制在二次侧，大大减小了网侧绕组及电网侧的谐波电流。

## 2.2. 整流系统主拓扑

由于硅整流二极管与晶闸管整流的控制方法不同，因此在选择联结方式时也有区别。常用于大功率负载的整流电路的联结型式[7]有六脉波双反星形带平衡电抗器联结和三相桥式联结。前者一般用于低电压、大电流场合，因为当输出直流电流相同时，其每臂的平均电流为后者的一半；而后者多用于输出电

压较高的电路，因为当输出直流电压相同时，其每臂承受的峰值电压是前者的一半。因此，在电压较高的整流系统中，一般采用三相桥式整流电路，使系统的变压器利用率高。

图 3(a)为三相桥式电路拓扑图[8]，图中  $VT_1$ 、 $VT_3$ 、 $VT_5$  共阴极连接， $VT_4$ 、 $VT_6$ 、 $VT_2$  共阳极组连接。

图 3(b)为整流波形。可见，当  $\pi/6 < \omega t < \pi/2$  时，线电压  $u_{ab}$  最高，二极管  $VT_1$  和  $VT_6$  承受正向电压而导通；当  $\pi/2 < \omega t < 5\pi/6$  时，线电压  $u_{ac}$  最高，二极管  $VT_1$  和  $VT_2$  承受正向电压而导通；当  $5\pi/6 < \omega t < 7\pi/6$  时，线电压  $u_{bc}$  最高，二极管  $VT_3$  和  $VT_2$  承受正向电压而导通；

当  $7\pi/6 < \omega t < 3\pi/2$  时，线电压  $u_{ba}$  最高，二极管  $VT_3$  和  $VT_4$  承受正向电压而导通；当  $3\pi/2 < \omega t < 11\pi/6$  时，线电压  $u_{ca}$  最高，二极管  $VT_5$  和  $VT_4$  承受正向电压而导通；当  $11\pi/6 < \omega t < 13\pi/6$  时，线电压  $u_{cb}$  最高，二极管  $VT_5$  和  $VT_6$  承受正向电压而导通。

### 2.3. 感应滤波系统介绍

应用于新型大功率整流系统的变压器为新型整流变压器，利用特定的绕组和变压器设计，实现了感应滤波。感应滤波技术的核心是通过大大降低滤波绕组及支路的谐波阻抗，且在谐波源就近处进行谐波抑制与无功功率补偿，大大提高谐波抑制效果并实现节能[9]-[11]。利用感应滤波技术，实现在最靠近阀侧安装全调谐滤波装置，使得 5、7、11、13 等次特征谐波电流被就近抑制在阀侧而基本上不通过网侧绕组。

通过增加变压器的二次滤波绕组，将滤波装置连接在变压器的阀侧，使得含量较大的绝大部分 5、7、11、13 次谐波电流被引流至滤波绕组及滤波装置构成滤波支路，从而大大缩短谐波的流通过程，且滤波支路较网侧绕组的谐波等值阻抗小的多，因此滤波效果显著。

图 4(a)为感应滤波器接线图，图 4(b)为应用于工程现场的感应滤波器实物照片。

## 3. 损耗计算方法研究

以某单机组大功率整流系统为例，介绍部件损耗的测量及计算方法[12] [13]。此系统采用等效 12 脉波，同相逆并联的结构形式，阀侧输出  $N$  根铜排与整流桥相连接。

### 3.1. 变压器效率测量

在工业现场测定变压器效率时，通常采用电压、电流互感器及电能质量分析仪，通过采集网侧及阀侧的电压、电流，计算出变压器的效率。

若阀侧输出  $N$  根铜排，则至少需要  $N + 1$  台电能质量分析仪备用。

在网侧安装电压、电流互感器，并连接好电能质量分析仪，网侧输入功率可由式(10)计算：

$$P_{wc} = U_{wc} \times k_u \times I_{wc} \times k_i \quad (10)$$

式(10)中， $U_{wc}$  为网侧电压， $k_u$  为电压互感器变比， $I_{wc}$  为网侧电流， $k_i$  为电流互感器变比。

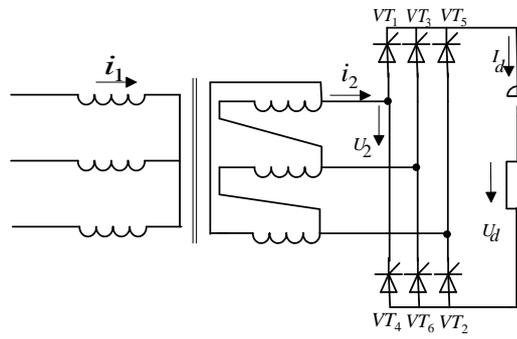
测量阀侧功率时，阀侧电压可直接测出，阀侧电流需要使用罗氏线圈互感器，阀侧输出单根铜排功率可有式(11)计算：

$$P_{fc1} = U_{fc} \times I_{fc} \times k_{ifc} \quad (11)$$

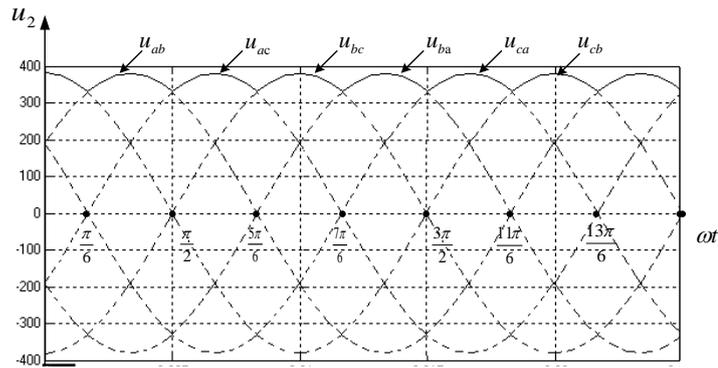
式(11)中， $U_{fc}$  为单根铜排电压， $I_{fc}$  为铜排电流， $k_{ifc}$  为罗氏线圈互感器变比。

由于阀侧输出  $N$  根铜排，则阀侧输出功率可表示为式(12)：

$$P_{fc} = N \times P_{fc1} \quad (12)$$



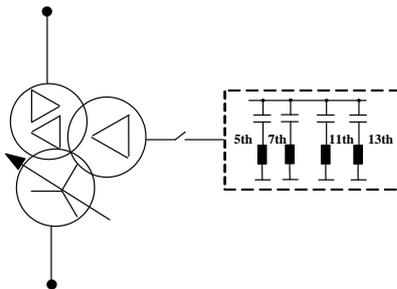
(a) 三相桥式电路拓扑图



(b) 整流波形图

Figure 3. Schematic diagram of the three phase bridge circuits

图 3. 三相桥式电路原理图



(a) 原理接线图



(b) 滤波器实物图

Figure 4. The connection diagram of the inductive filter and the prototype photo

图 4. 感应滤波器接线图及其样机照片

变压器效率即可由式(13)算出:

$$\eta_1 = \frac{P_{wc}}{P_{fc}} \quad (13)$$

### 3.2. 整流器效率测量

在测量整流器效率时,需测量交流侧电流、半桥臂晶闸管电压、直流侧电流、直流侧电压,因为需配备电能质量分析仪、电流互感器等测量设备。

由于整流桥交流侧的电流为交流全波,而桥臂的电流为直流半波,故需将测得的交流全波去掉负值部分,以得到桥臂直流电流波形。

以 A 相为例,设桥臂直流电流波形为  $i_{qd}$ , 桥臂电压波形为  $u_{qd}$ , 则桥臂瞬时功率波形为:

$$q_d = u_{qd} \times i_{qd} \quad (14)$$

将瞬时功率波形在一个周期内求平均值,可得到单个桥臂上消耗的有功功率,该有功功率代表了单个桥臂的损耗,可由式(15)表示:

$$P_{qdA} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{qd} dt = \frac{1}{T} \int_0^T u_{qd} i_{qd} dt = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_{qdk} i_{qdk} \quad (15)$$

式中,  $u_{qdk}$  和  $i_{qdk}$  为 A 相电压和电流波形第 k 点的采样值, N 为一个周期内的采样点数。

可以得到同一整流桥 B 相和 C 相的损耗  $P_{qdB}$  和  $P_{qdC}$ 。将  $P_{qdA}$ 、 $P_{qdB}$ 、 $P_{qdC}$  相加,即得到一个整流桥半桥(3 个桥臂)的总损耗  $P_{qd}$ 。

$$P_{qd} = P_{qdA} + P_{qdB} + P_{qdC} \quad (16)$$

一个整流桥包含上下 2 个半桥(共 6 个桥臂), N 个整流桥共包含(2×N)个半桥。取此 N 台电能质量分析仪的数据计算损耗,然后取其平均值  $P_{qd(av)}$ ,即单个半桥损耗的平均值,该值乘以(2×N),即得到整流柜的损耗  $P_z$ ,即如式(17)所示:

$$P_z = 2 \times N \times P_{qd(av)} \quad (17)$$

整流器输出的直流功率可由式(18)算出:

$$P_d = U_d \times I_d \quad (18)$$

整流器效率即可由式(19)算得:

$$\eta_2 = \frac{P_d}{P_z + P_d} \quad (19)$$

### 3.3. 滤波器效率测量

当系统投入滤波器时,可用电能质量分析仪、电压互感器和电流互感器测定滤波器出线处的电压、电流,据此可计算滤波器的有功功率,如式(20)所示:

$$P_{lbq} = U_{lbq} \times k_{lu} \times I_{lbq} \times k_{li} \quad (20)$$

式中,  $U_{lbq}$  和  $I_{lbq}$  分别为滤波器出线处电压、电流,  $k_{lu}$  和  $k_{li}$  分别为电压、电流互感器变比。

按照式(25)计算得到的有功功率即为滤波器的损耗。

## 4. 工程应用

图 5 为应用于某电解锰厂直流供电系统的大功率整流装置实物图。

选取某单机组对其效率及功率因数进行测量，系统接线图及测量点如图 6 所示。该系统为等效 12 脉波(Y 和 $\Delta$ 共铁芯)，采用同相逆并联的联结方式，阀侧输出四个联结组，通过 12 根铜排与 4 个整流桥相连接。

按照前述的测量及计算方法，测定变压器组在十分钟之内网侧和阀侧的总功率平均值，数据如表 1 所示。



Figure 5. The prototype of the large-power rectified system

图 5. 工程应用的新型大功率整流系统样机

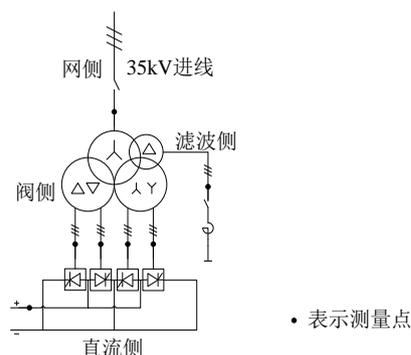


Figure 6. Connection diagram of the system and measuring location

图 6. 系统接线图及测量点

Table 1. The efficiency of the transformer (including the filter)

表 1. 机组变压器(含滤波器)效率测量情况

输入功率(kW)	A 相	3198.92
	B 相	3252.93
	C 相	3264.89
	三相总功率	9716.74
输出功率(kW)	连接组 1	2542.50
	连接组 2	2380.49
	连接组 3	2397.86
	连接组 4	2268.86
	合计	9589.71
损耗(kW)		127.03
效率(%)		98.7

**Table 2. The efficiency of the rectifier**  
**表 2. 整流器效率测量情况**

整流桥损耗(kW)	1#半桥	6.80
	2#半桥	7.86
	3#半桥	8.43
	4#半桥	7.95
	平均值	7.76
	8 个半桥合计	62.09
整流桥直流电流 (kA)	1#桥	4.32
	2#桥	4.16
	3#桥	3.82
	4#桥	3.94
	平均值	4.06
	4 桥合计	16.24
整流桥电压(V)	564.46	
整流桥输出功率(kW)	9166.83	
整流桥输入功率(kW)	9228.92	
整流器效率	99.33%	

从 10 分钟的记录数据中可计算变压器(含滤波器)的平均功率值, 算得其损耗为 127.03 kW, 效率为 98.7%。

整流器组由四组整流桥构成, 一个整流桥包含上下两个半桥, 所以 4 个整流桥共包含八个半桥。由 3.2 小节可知, 在计算整流器损耗时, 可分别测得四个整流桥的半桥损耗, 再以其平均值乘以 8 即可得整流器组的损耗。

测定整流器组的半桥损耗值、总直流电流、直流电压, 所得数据如表 2 所示。根据损耗值及同时测得的直流电流和电压, 可计算出整流器的效率为 99.33%。分别测出滤波器的电压、电流波形, 可计算出滤波器的损耗约为 14 kW。通过以上测量及计算, 可由总损耗值及机组输出功率算出整套机组的效率为:

$$\eta = \frac{P_{sc}}{P_{sc} + P_{sh}} = \frac{9166.83}{9166.83 + 127.03 + 62.09} \times 100(\%) = 98\%$$

## 5. 结论

本文介绍了一种基于新型整流变压器的大功率整流系统, 并对其拓扑结构及原理进行了分析和阐述。针对以往的现场测量未能区分大功率整流系统的各部件损耗之局限性, 本文提出了一种现场实时测量各部件损耗的方法, 以此计算整流变压器、滤波器和整流器等部件的效率和机组整体效率。通过对某工业电解车间进行详细的现场测试, 验证了测量及计算方法的正确性。

## 项目基金

湖南省自然科学基金重点项目资助(12JJ2034)。

## 参考文献 (References)

- [1] 刘杆斌, 冯公伟, 崔督普, 等 (1983) 硅整流所电力设计. 冶金工业出版社, 北京.
- [2] Siebert, A., Troedson, A. and Ebner, S. (2002) AC to DC Power Conversion Now and in the Future. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **38**, 934-940.
- [3] 李勇, 罗隆福, 张志文, 等 (2010) 应用感应滤波原理构建的直流供电系统. *中国电机工程学报*, **22**, 07-112.
- [4] 宁志毫, 罗隆福, 李勇, 等 (2012) 基于感应滤波的大功率整流系统原理分析及综合节能设计. *电工技术学报*, **27**, 223-228.
- [5] Li, Y., Luo, L., Rehtanz, C, et al. (2012) An industrial dc power supply system based on an inductive filtering method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **59**, 714-722.
- [6] 马丁, J·希思科特 (2004) 变压器实用技术大全. 王晓莺, 杨俊海, 王文昌, 译. 机械工业出版社, 北京, 338-356, 547-555.
- [7] 宋卓彦 (2005) 大电流直流稳压/稳流电源研究. 硕士学位论文, 华北电力大学, 保定, 12-13.
- [8] 王兆安, 黄俊 (2000) 电力电子技术. 机械工业出版社, 北京.
- [9] Ning, Z.H., Luo, L.F., Xu, J.Z., et al. (2010) Technical analysis and synthesis energy saving design of the high power DC power supply system. 2010 *International Conference on Power System Technology*, 24-27 October 2010, Hangzhou, 1-6.
- [10] Luo, L.F., Li, Y., Xu, J.Z. et al. (2008) A new converter transformer and a corresponding inductive filtering method for HVDC transmission system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **23**, 1426-143.
- [11] 李勇, 罗隆福, 贺达江, 等 (2009) 新型直流输电系统典型谐波分布特性分析. *电力系统自动化*, **10**, 59-63.
- [12] GB/T 18293-2001 (2001) 电力整流设备运行效率的在线测量. 国家质量技术监督局, 北京
- [13] GB/T 24566 -2009 (2008) 整流设备节能监测. 中国国家标准化管理委员会, 北京.