

电除尘用高频高压电源的研制

魏云峰

(Genvolt New Road, Highley, Bridgnorth, Shropshire, UK)

摘要 高压开关电源已经广泛应用到很多领域，最近几年在电除尘应用方面也得到了较大的发展。本文提出了我们对设计高压开关电源的一些思考，并扼要介绍了我们最新研制的用于电除尘的 32kW 高频高压开关电源。

1 前言

近几年，大家已经开始认识到高频高压开关电源用于电除尘的一些突出的优点。很多研究报告也都显示高频高压开关电源能够显著提高除尘的效率，能够大大提高功率因素。在间歇方式工作时，由于其关断和开通时间大大缩短，因而可以更有效的处理反电晕及提高高比电阻粉尘的收集能力，等等。

然而与其他应用领域有所不同，电除尘的环境及其负载特性对高频高压开关电源提出了极为苛刻的要求。首先是电除尘用高频高压电源只能安装在室外而且置于房顶，电源的设计必须考虑温度，湿度，海拔高度，灰尘等因素的影响。仅温度一项就极为棘手。众所周知，电子元件都是由许许多多的 PN 节构成，而 PN 节温度最高只能为 125 摄氏度，少有可达 150 度。高于此温度则立刻烧毁。温度越是远离此上限温度，则工作越可靠。这就要求电除尘用高频高压电源的温升尽可能低。

负载特性是电除尘电源有别于其他应用的又一个特点。除了负载的动态变化范围大之外，电源必须能承受多达每秒一次的频繁放电也是一个苛刻的要求。

对电除尘电源的控制也和其他的高压开关电源很不一样。常规的高压电源追求低纹波，高稳定度，好的线性或负载调整率等，基本上是一个电压源。用于电除尘的高压开关电源输出特性更像一个电流源，同时又希望能够任意设置电压的波形，响应速度快，过冲小，耐受频繁的火花放电。

2 电除尘用高频高压电源设计上的考虑

见诸有关资料的用于电除尘的高压开关电源各有特色。电路上大致可分为功率输入部分，逆变部分，升压整流输出部分以及对电源的控制部分。

2.1 电源功率输入部分

高功率的电源都采用三相输入，不可控三相整流，滤波。功率因素都较工频单相电源有很大改善。

2.2 功率逆变

功率逆变部分而言，普遍采用四开关管 H 型桥式结构。为提高工作频率，也有多个小功率高速开关管并联或多个 H 桥逆变器并联。控制方式则有定频变脉宽调制（PWM），移相变脉宽调制或定脉宽变频调制（PFM）等几种。

PWM 方式的优点是有成熟的定量的分析方法，电源特性好，逆变器无环流，通态损耗低。由于频率固定，电磁干扰也比较容易解决。缺点是开关器件有关断损耗。前些年由于逆变器件关断损耗大，很难做成 20kHz 以上的高功率逆变器。然而近年来随着低开关损耗器件的普及，这一问题已逐步得到解决。

由于高压变压器不可避免存在分布电容，PWM 方式也可以利用该分布电容构成并联谐振逆变器，从而进一步降低关断损耗。

PFM 方式比较适合电除尘用高频高压电源的应用，尤其在纹波，稳定度等要求不高的场合。高压变压器漏感通常都必较大，但在 PFM 方式的逆变电路中，变压器漏感却可以和外加电容电感一起构成串联谐振电路。通过改变逆变器的工作频率就可以改变输出电压。

电除尘电源对纹波要求不高，功率通常比较高。串联谐振电路非常适合此一领域的应用。工作频率始终只有谐振频率的一半以下时，逆变器的电流峰值高但有效值较低，输出电压上升率会受到一定的限制。另外特征阻抗较电流连续状态低，在同样过载条件同样工作频率下，逆变器过载电流偏大。因此工作频率工作在谐振频率的 0.8 倍左右时，可以改善以上缺点。

2.3 升压高压整流输出

升压整流输出部分，电除尘用高频高压电源采用升压变压器配合直流倍压电路来得到所需要的高压。在保证输出电压及性能时尽可能降低高压变压器的输出电压。这样做的原因有几条：一是高变比时，影响电路性能。二是高频变压器铁心（磁芯）窗口很小，输出电压受空间限制不能太高。三是不利于散热。电除尘高压电源由于放电比较频繁，有不少设计努力采用仅靠变压器升压，整流来获得需要的高压，势必大大增加高频变压器的制造度。

2.4 电源的控制

电源的控制部分而言，其实可以分为两个层面：一个层面对电源本身的控制，比如恒压特性，恒流特性，负载调整特性，输入调整特性，方波响应，纹波控制以及各种保护等。另一个层面是控制电源以期达到我们的要求，比如如何使其工作在放电临界态，如何使其工作在间歇状态，峰值电压的设置，谷值电压的设置，间歇时间的设置，上升率的设置，等等。

3 400mA, 80kV 高压开关电源的研制

我们在多年研制、生产高压开关电源的基础上，结合电除尘的实际应用经验，开发了 32kW 高频高压开关电源。

3.1 主要设计指标：

存储温度： - 40° C to + 70° C
工作温度： - 30 ° C to + 50° C
电源温升： <20° C
IP 级别： 55

输入电压： 3 相 380VAC
输出电压： 0-80kVDC (负极性电压),
输出电流： 0-400mADC
最高输出功率： 32kW
输出电压纹波： <5%
功率因素： >0.9
转换效率： >90%

3.2 主要技术方案

机械部分：

为了能在恶劣环境下工作，系统采用密封结构。高压部分用变压器油绝缘。几乎所有发热元件的热量也都已各种方式导入变压器油中。高压输出在电源的底部，这样可以简化电源安装，便于实施一体化。

冷却及散热：

据有关统计表明，80%的开关电源的损坏是由于发热造成的，因此有效的冷却系统是开关型电源可靠工作的有力保障。为此我们的电源系统采用油循环冷却。将 IGBT 重要发热器件的热量导入到变压器油中，因此冷却了油，也就冷却了整个电源的重要发热器件。此一做法的好处在于只要控制好油温，就能保证 IGBT 安全的运行。

输入整流部分：

我们设计的高压开关电源的特点之一是输入整流之后不采用任何作为滤波用的电解电容，只采用高性能的电容 100 μ F，而通常的开关电源为了减小输出的纹波，在输入整流之后都加入了很大的电解滤波电容。大功率电源采用三相输入，整流后电压达到 530V，电解电容耐压不够，必须串并结合，数量需要更多。大容量高压电解电容价格昂贵是我们考虑的一个因素，更重要的一个考虑是温度对电解电容的寿命影响极大。

功率逆变部分：

采用串联谐振式逆变器，PFM 方式调节。满载时逆变器电流进入连续状态。效率比非连续电流工作的逆变器会有 1-2% 的降低，但流过 IGBT 的峰值电流比非连续电流工作时减小。非满功率运行时，逆变器电流也处在非连续状态。

升压高压整流输出部分：

采用了两级倍压电路，降低高压变压器的绝缘，减小变压器的分布电容。而且变压器的铁心完全可以采用标准成型产品，绕制工艺及其简单，大大提高了可靠性并且降低成本。由于采用了倍压电路，高压整流硅堆只需全波整流的一半，而高压滤波电容的成本也约为高压整流硅堆的一半。整流部分成本相当。

当出现火花放电时，电容的储能会泻放到电场里去，这是倍压电路的缺点。但实际上如果按每分钟放电 60 次计算，放电的平均功率只有不到 30 瓦，不到电源额定功率的千分之一。另外采用了我们的特有的放电限流电路，80kV 时放电电流也被限制在 200A 以下，因此其影响已经非常小了。而倍压电容可以有效抑制加到高压硅堆上的过电压，这是它的优点。

控制部分

这里只说明电源本身的控制。电源有输出电压和输出电流检测回路，各自的响应特性都非常好。系统存在电压和电流的双环 PID 调节。能自动工作在恒压或恒流状态。由于调整环节的带宽远高于三相滤波后的纹波频率，因此输入纹波被抑制掉。

电源保护：

输入：欠压保护，雷电过压保护，过流保护

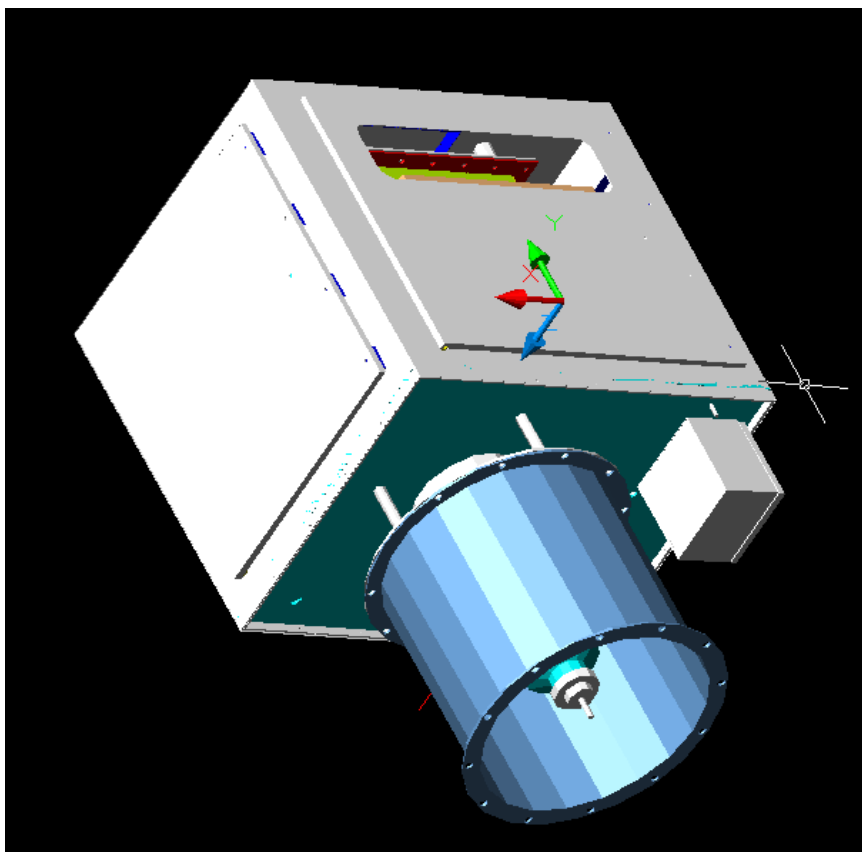
输出：过压保护，过流保护，放电限流保护

逆变器：过流保护，直通保护，过热保护

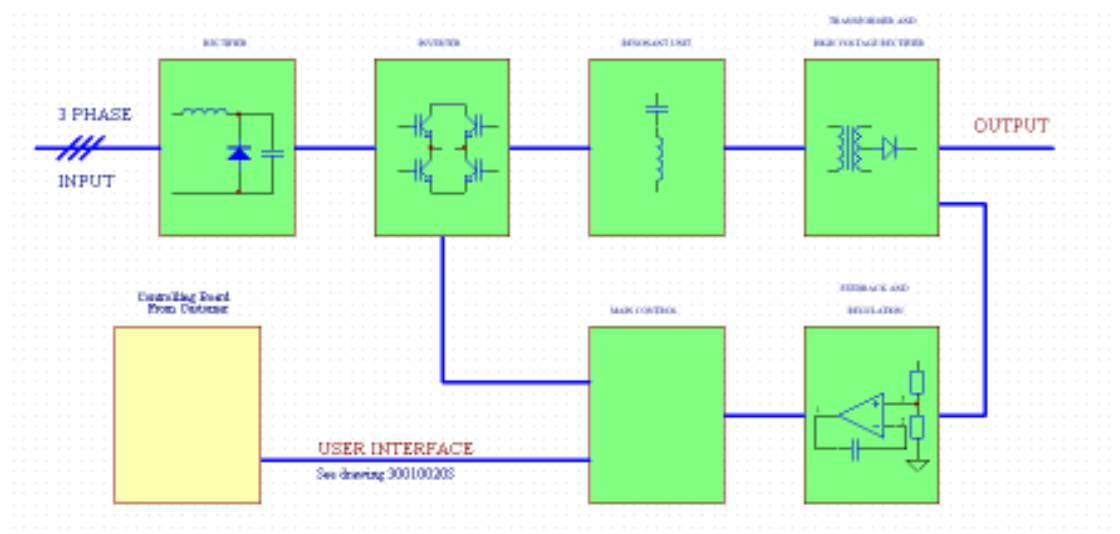
变压器油：过热保护，油位保护

安全：连锁保护

以上述思路为指导的高压开关电源的设计模型如下图一：



图一 高压开关电源的模型



图二电源的电路框图

图二电源的电路框图

图三为实际研制的电源：



图三 实际的 32kW 高压开关电源

图四 高压输出上升沿波形



图四 高压输出上升沿波形

这是一张工作于 64kV 的示波图（极性反转）。由图可见，整个上升时间大约 3ms，约 20kV/ms。基本上为线性上升。

表一

环境温度	IGBT 散热器上温度	变压器最高油温
22 度	38 度	42 度

表一 是满功率稳定运行后纪录的温升数据，由表中数据可见，该电源的变压器油的温升最多只有 20 度，甚至只有常规工频高压整流变压器的一半。这对提高可靠性有很大的帮助。

对该高压电源作开路，短路，轻载，满载，过载，放电等各种试验，结果表明，该电源可以在电压 0-80kV，电流 0-400mA 的任何点上稳定运行。并可以耐受各种强度的放电。

4 结论

用于电除尘领域的高压开关电源有其特殊性，其设计难度相当大。但由于我们有多年的经验积累，研制工作还是比较顺利。其实两年前我们已经有了同类型的样机在国外某电厂运行，情况良好。这次我们又对电源作了很多的改进，性能得到很大的改善。根据实际运行及实验室测试，我们有如下结论：

- (1) 电源的输入部分不加大容量电解电容是可行的，这对提高电源的可靠性及寿命大有好处。
- (2) 串联谐振逆变器可以非常可靠地运行。
- (3) 目前的高压开关电源电压上升率大约为 20kV/ms。
- (4) 该电源的温升较小，很有可能在环境温度 50 度也可以可靠工作。这方面还要做进一步的试验。
- (5) 采用倍压电路可以大大降低对高压变压器的要求，这也是提高可靠性的重要一环。成本并不会升高，制造工艺会简化。
- (6) 该高压电源可以在电压 0-80kV，电流 0-400mA 整个矩形区域内任何一点都稳定可靠地工作。

电除尘用高频高压电源的研制

魏云峰

(Genvolt New Road, Highley, Bridgnorth, Shropshire, UK)

摘要 高压开关电源已经广泛应用到很多领域，最近几年在电除尘应用方面也得到了较大的发展。本文提出了我们对设计高压开关电源的一些思考，并扼要介绍了我们最新研制的用于电除尘的 32kW 高频高压开关电源。

1 前言

近几年，大家已经开始认识到高频高压开关电源用于电除尘的一些突出的优点。很多研究报告也都显示高频高压开关电源能够显著提高除尘的效率，能够大大提高功率因素。在间歇方式工作时，由于其关断和开通时间大大缩短，因而可以更有效的处理反电晕及提高高比电阻粉尘的收集能力，等等。

然而与其他应用领域有所不同，电除尘的环境及其负载特性对高频高压开关电源提出了极为苛刻的要求。首先是电除尘用高频高压电源只能安装在室外而且置于房顶，电源的设计必须考虑温度，湿度，海拔高度，灰尘等因素的影响。仅温度一项就极为棘手。众所周知，电子元件都是由许许多多的 PN 节构成，而 PN 节温度最高只能为 125 摄氏度，少有可达 150 度。高于此温度则立刻烧毁。温度越是远离此上限温度，则工作越可靠。这就要求电除尘用高频高压电源的温升尽可能低。

负载特性是电除尘电源有别于其他应用的又一个特点。除了负载的动态变化范围大之外，电源必须能承受多达每秒一次的频繁放电也是一个苛刻的要求。

对电除尘电源的控制也和其他的高压开关电源很不一样。常规的高压电源追求低纹波，高稳定度，好的线性或负载调整率等，基本上是一个电压源。用于电除尘的高压开关电源输出特性更像一个电流源，同时又希望能够任意设置电压的波形，响应速度快，过冲小，耐受频繁的火花放电。

2 电除尘用高频高压电源设计上的考虑

见诸有关资料的用于电除尘的高压开关电源各有特色。电路上大致可分为功率输入部分，逆变部分，升压整流输出部分以及对电源的控制部分。

2.1 电源功率输入部分

高功率的电源都采用三相输入，不可控三相整流，滤波。功率因素都较工频单相电源有很大改善。

2.2 功率逆变

功率逆变部分而言，普遍采用四开关管 H 型桥式结构。为提高工作频率，也有多个小功率高速开关管并联或多个 H 桥逆变器并联。控制方式则有定频变脉宽调制（PWM），移相变脉宽调制或定脉宽变频调制（PFM）等几种。

PWM 方式的优点是有成熟的定量的分析方法，电源特性好，逆变器无环流，通态损耗低。由于频率固定，电磁干扰也比较容易解决。缺点是开关器件有关断损耗。前些年由于逆变器关断损耗大，很难做成 20kHz 以上的高功率逆变器。然而近年来随着低开关损耗器件的普及，这一问题已逐步得到解决。

由于高压变压器不可避免存在分布电容，PWM 方式也可以利用该分布电容构成并联谐振逆变器，从而进一步降低关断损耗。

PFM 方式比较适合电除尘用高频高压电源的应用，尤其在纹波，稳定度等要求不高的场合。高压变压器漏感通常都比较大，但在 PFM 方式的逆变电路中，变压器漏感却可以和外加电容电感一起构成串联谐振电路。通过改变逆变器的工作频率就可以改变输出电压。

电除尘电源对纹波要求不高，功率通常比较高。串联谐振电路非常适合此一领域的应用。工作频率始终只有谐振频率的一半以下时，逆变器的电流峰值高但有效值较低，输出电压上升率会受到一定的限制。另外特征阻抗较电流连续状态低，在同样过载条件同样工作频率下，逆变器过载电流偏大。因此工作频率工作在谐振频率的 0.8 倍左右时，可以改善以上缺点。

2.3 升压高压整流输出

升压整流输出部分，电除尘用高频高压电源采用升压变压器配合直流倍压电路来得到所需要的高压。在保证输出电压及性能时尽可能降低高压变压器的输出电压。这样做的原因有几条：一是高变比时，影响电路性能。二是高频变压器铁心（磁芯）窗口很小，输出电压受空间限制不能太高。三是不利于散热。电除尘高压电源由于放电比较频繁，有不少设计努力采用仅靠变压器升压，整流来获得需要的高压，势必大大增加高频变压器的制造度。

2.4 电源的控制

电源的控制部分而言，其实可以分为两个层面：一个层面对电源本身的控制，比如恒压特性，恒流特性，负载调整特性，输入调整特性，方波响应，纹波控制以及各种保护等。另一个层面是控制电源以期达到我们的要求，比如如何使其工作在放电临界态，如何使其工作在间歇状态，峰值电压的设置，谷值电压的设置，间歇时间的设置，上升率的设置，等等。

3 400mA, 80kV 高压开关电源的研制

我们在多年研制、生产高压开关电源的基础上，结合电除尘的实际应用经验，开发了 32kW 高频高压开关电源。

3.1 主要设计指标：

存储温度： - 40° C to + 70° C
工作温度： - 30 ° C to + 50° C
电源温升： <20° C
IP 级别： 55

输入电压： 3 相 380VAC
输出电压： 0-80kVDC (负极性电压),
输出电流： 0-400mADC
最高输出功率： 32kW
输出电压纹波： <5%
功率因素： >0.9
转换效率： >90%

3.2 主要技术方案

机械部分：

为了能在恶劣环境下工作，系统采用密封结构。高压部分用变压器油绝缘。几乎所有发热元件的热量也都已各种方式导入变压器油中。高压输出在电源的底部，这样可以简化电源安装，便于实施一体化。

冷却及散热：

据有关统计表明，80%的开关电源的损坏是由于发热造成的，因此有效的冷却系统是开关型电源可靠工作的有力保障。为此我们的电源系统采用油循环冷却。将 IGBT 重要发热器件的热量导入到变压器油中，因此冷却了油，也就冷却了整个电源的重要发热器件。此一做法的好处在于只要控制好油温，就能保证 IGBT 安全的运行。

输入整流部分：

我们设计的高压开关电源的特点之一是输入整流之后不采用任何作为滤波用的电解电容，只采用高性能的电容 100 μ F，而通常的开关电源为了减小输出的纹波，在输入整流之后都加入了很大的电解滤波电容。大功率电源采用三相输入，整流后电压达到 530V，电解电容耐压不够，必须串并结合，数量需要更多。大容量高压电解电容价格昂贵是我们考虑的一个因素，更重要的一个考虑是温度对电解电容的寿命影响极大。

功率逆变部分：

采用串联谐振式逆变器，PFM 方式调节。满载时逆变器电流进入连续状态。效率比非连续电流工作的逆变器会有 1-2% 的降低，但流过 IGBT 的峰值电流比非连续电流工作时减小。非满功率运行时，逆变器电流也处在非连续状态。

升压高压整流输出部分：

采用了两级倍压电路，降低高压变压器的绝缘，减小变压器的分布电容。而且变压器的铁心完全可以采用标准成型产品，绕制工艺及其简单，大大提高了可靠性并且降低成本。由于采用了倍压电路，高压整流硅堆只需全波整流的一半，而高压滤波电容的成本也约为高压整流硅堆的一半。整流部分成本相当。

当出现火花放电时，电容的储能会泻放到电场里去，这是倍压电路的缺点。但实际上如果按每分钟放电 60 次计算，放电的平均功率只有不到 30 瓦，不到电源额定功率的千分之一。另外采用了我们的特有的放电限流电路，80kV 时放电电流也被限制在 200A 以下，因此其影响已经非常小了。而倍压电容可以有效抑制加到高压硅堆上的过电压，这是它的优点。

控制部分

这里只说明电源本身的控制。电源有输出电压和输出电流检测回路，各自的响应特性都非常好。系统存在电压和电流的双环 PID 调节。能自动工作在恒压或恒流状态。由于调整环节的带宽远高于三相滤波后的纹波频率，因此输入纹波被抑制掉。

电源保护：

输入：欠压保护，雷电过压保护，过流保护

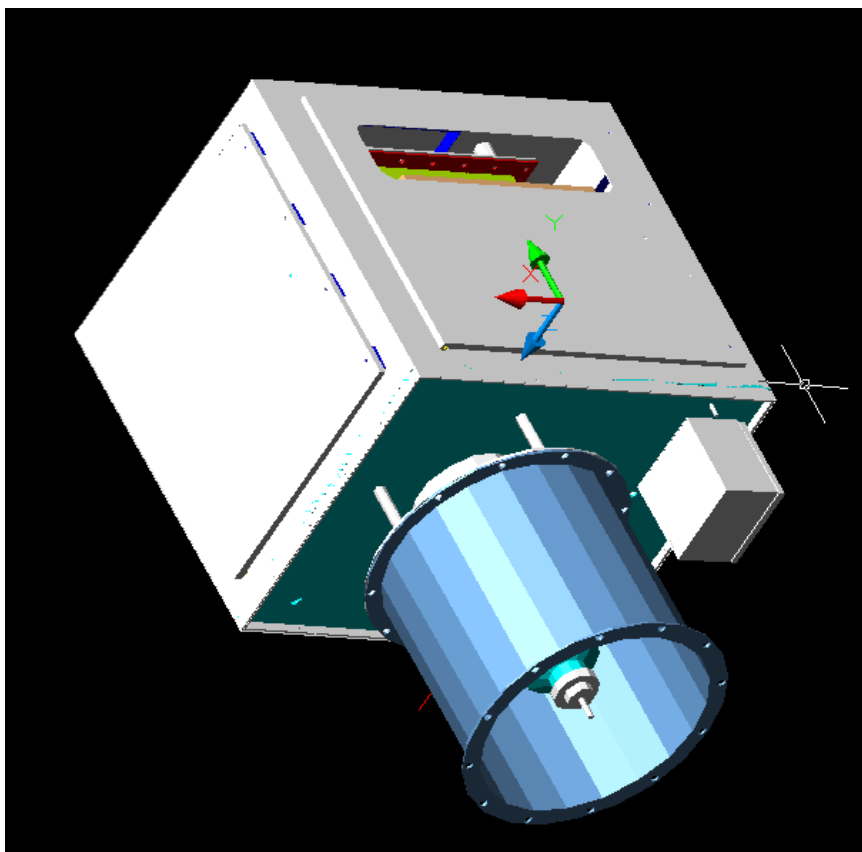
输出：过压保护，过流保护，放电限流保护

逆变器：过流保护，直通保护，过热保护

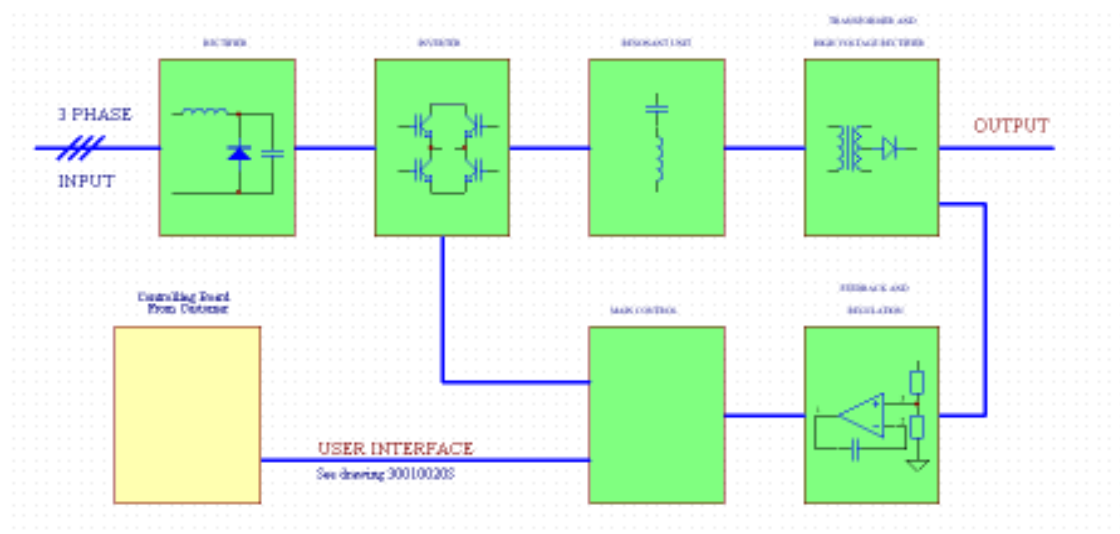
变压器油：过热保护，油位保护

安全：连锁保护

以上述思路为指导的高压开关电源的设计模型如下图一：



图一 高压开关电源的模型



图二电源的电路框图

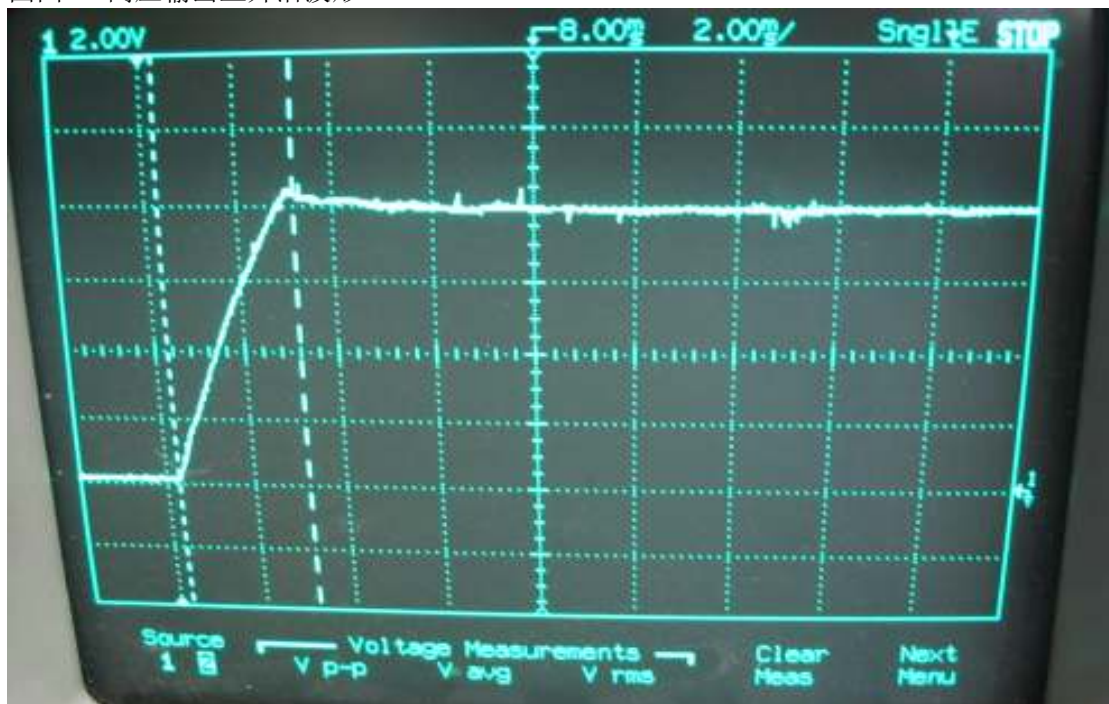
图二电源的电路框图

图三为实际研制的电源：



图三 实际的 32kW 高压开关电源

图四 高压输出上升沿波形



图四 高压输出上升沿波形

这是一张工作于 64kV 的示波图（极性反转）。由图可见，整个上升时间大约 3ms，约 20kV/ms。基本上为线性上升。

表一

环境温度	IGBT 散热器上温度	变压器最高油温
22 度	38 度	42 度

表一 是满功率稳定运行后纪录的温升数据，由表中数据可见，该电源的变压器油的温升最多只有 20 度，甚至只有常规工频高压整流变压器的一半。这对提高可靠性有很大的帮助。

对该高压电源作开路，短路，轻载，满载，过载，放电等各种试验，结果表明，该电源可以在电压 0-80kV，电流 0-400mA 的任何点上稳定运行。并可以耐受各种强度的放电。

4 结论

用于电除尘领域的高压开关电源有其特殊性，其设计难度相当大。但由于我们有多年的经验积累，研制工作还是比较顺利。其实两年前我们已经有了同类型的样机在国外某电厂运行，情况良好。这次我们又对电源作了很多的改进，性能得到很大的改善。根据实际运行及实验室测试，我们有如下结论：

- (1) 电源的输入部分不加大容量电解电容是可行的，这对提高电源的可靠性及寿命大有好处。
- (2) 串联谐振逆变器可以非常可靠地运行。
- (3) 目前的高压开关电源电压上升率大约为 20kV/ms。
- (4) 该电源的温升较小，很有可能在环境温度 50 度也可以可靠工作。这方面还要做进一步的试验。
- (5) 采用倍压电路可以大大降低对高压变压器的要求，这也是提高可靠性的重要一环。成本并不会升高，制造工艺会简化。
- (6) 该高压电源可以在电压 0-80kV，电流 0-400mA 整个矩形区域内任何一点都稳定可靠地工作。