

技术更新

对一种新兴电力品质改善装置的技术评估和应用指南

电力品质解决方案中的能量存储和电力电子技术

绪论

与电力品质干扰有关的问题

持续断电并不是给电力用户造成问题的唯一事件。和真的停机一样，在停机之前的瞬间分断及重合动作对敏感的终端设备也是有害的。例如，半导体制造厂就特别容易受到瞬间中断的侵害。制造一块半导体芯片的总时间可能要长达 30 天，涉及到许多关键的工艺处理过程。如果在这些工艺过程中发生电压突降或瞬间中断，导致一台敏感的机器停机或不正常的运行，则芯片随时会被损坏。其他对电压突降或瞬间中断很敏感的行业包括塑料、橡胶、造纸、纺织、玻璃、汽车和钢铁厂等。

大多数工厂设备具有机械和电气上的惯性，因而可以跨越电压突降，但是控制机器的电气接触器和继电器却不是这样。接触器在电压开始降至名义电压的 75% 的 5~20 毫秒之内就会跳开。这些接触器往往负责关停整个生产过程。这些事件对电力用户来说是复杂、耗时的，同时还会造成巨大经济损失。

创新的基于逆变器的电压突降抑制装置

本技术更新讲述了该装置的工作原理、特性和应用。这是一种基于三相逆变器、被设计用来抑制电压突降影响的装置，称之为快速电压调节器（AVC）。由制造商指明的关键特性包括：

- 对三相压降至名义电压的 50%、单相压降至名义电压的 25% 作出校正
- 当输入电压在名义电压的 -10% 范围内变化时，持续的 +/- 1% 的输出电压调节
- 对输入的不平衡电压作校正
- 2 至 4 毫秒的响应时间，依照电压突降幅度和负载状况而定
- 数字化控制的执行方式，有助于输入电压的快速调节
- 过压和短路保护
- 保险丝断路能力及具有电压事件记录和故障电流记录的诊断系统

快速电压调节器（AVC）的工作原理

图 1 是 AVC 简单的原理框图。AVC 的控制电路中有一微处理器，独立地对输入电源电压的每一相作持续监测。控制电路与电压源逆变器以及连接在串联注入变压器的脉宽调制（PWM）滤波器相连。串联注入变压器是一个三相变压器，其初级为三角形连接。图 2 是一台 AVC 内部串联注入变压器的连接图。其次级的三个绕组与三相输入端相串联。



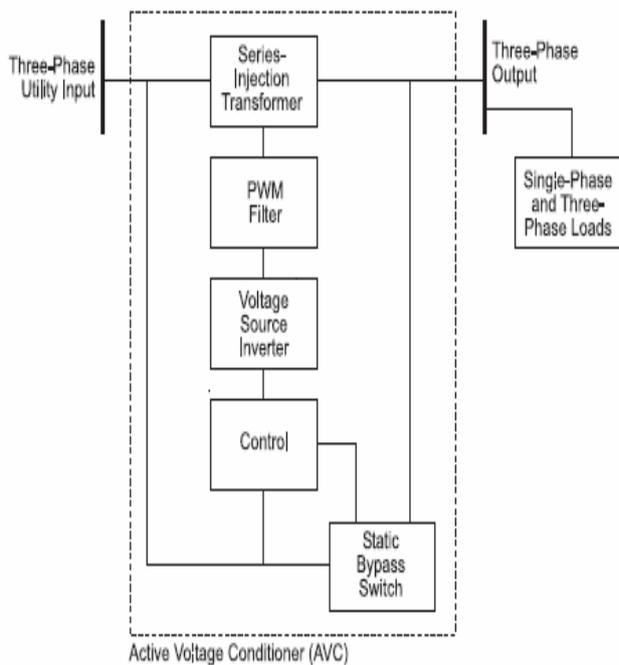


图 1. 工作原理和方框图

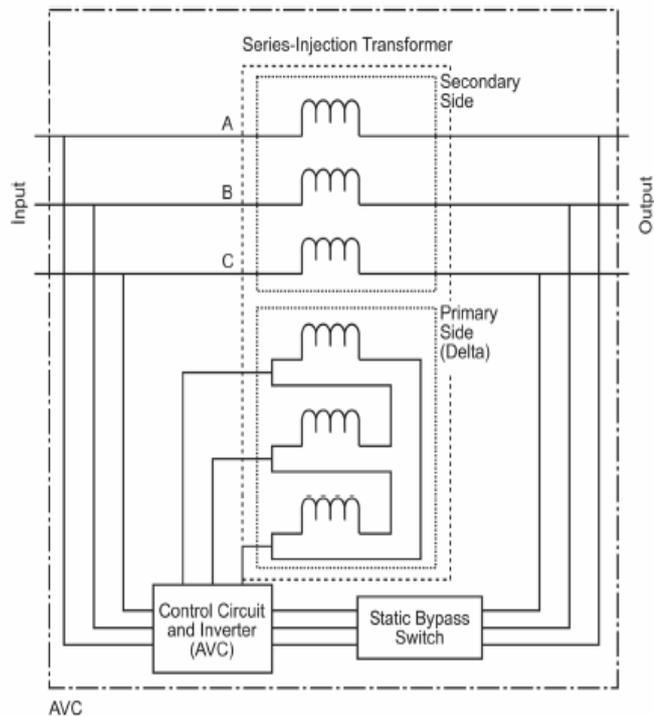


图 2. 串联注入变压器连接图

当输入电源的一相或所有三相出现电压突降或过压时，AVC 就会判断电压的矢量变化，然后计算出将电压波形调回到正常的且平衡的正弦波所需的校正电压值。与负载串联的注入变压器被配置为一个电压源，在电压出现突降时，逆变器将一附加的电压通过变压器注入到需要电压升高的一相或多相之中，调节了输出到负载的电压。在正常工作情况下，控制电路只把校正电压，也就是串联绕组上的电压，加到输入电压上，使输出电压保持在电压调节率范围之内。静态旁路开关是常开的，但在 AVC 发生故障时它会接通，这样 AVC 机组就被旁路，负载直接与电网连接。这种基于逆变器的技术可将工厂的电压调节在名义电压的 2% 以内，其响应时间为 2 至 4 毫秒（取决于突降深度）。

由微处理器计算的脉宽调制（PWM）开关波形来控制 IGBT 开关装置。逆变器输出电压经滤波后通过串联电力变压器注入到电源中。虽然逆变器中的直流母线排上的电容储存有少量的能量，但在出现欠压或电压突降时，逆变器的电力是通过整流器从供给工厂的剩余电压中获取的。AVC 的工作原理就是基于这样的事实，即电压突降期间能量可以从电网中取得，同时对供给工厂的剩余电压的影响则小到可忽略不计。

AVC 的类型

AVC 型号有两种：

- **AVC-S**，这是标准型 AVC，在三相市电欠压和三相电压突降时提供连续的电压调节。该型号对电压突升不提供调节。
- **AVC-R**，这是增强型，除了具有 AVC-S 型所有功能外，还对三相市电过电压及高至 110% 名义电压的电压突升作连续调节。

两种型号都可适用于从小型单个负载到数兆伏安容量的整座工厂。每种型号对完全地三相校正的最大值都

有规定。例如，一台 30%压降校正的 AVC 可对三相市网压降低至 70%名义电压提供完全校正，而一台 40%压降校正的 AVC 则对三相市网压降低至 60%提供完全校正，并至少持续 30 秒。“完全校正”的含义是在三相电压突降期间，AVC 的输出电压被恢复到 100%名义电压。所有型号的 AVC 都对低至 50%的电网三相电压突降提供部分校正，且持续时间不少于 30 秒。

AVC 特性测试

以下章节阐述了在 EPRI PEAC 实验室对一台容量为 50 kVA、208 V、40%校正的 AVC-S 机型所进行的各种测试。特性测试突显了一些在典型的制造业工厂中（如半导体生产、玻璃制造和塑料制造）发生的多数普遍及某些极端的情况。这些特性测试显示了该装置处理工厂中出现的极端情况的能力。此外，这些特性测试也提供了信息来帮助用户评估该装置对特定设备的适用性。下面章节对这些测试、步骤和结果作简单的说明。

特性测试包括下列内容：

- 电压突降和电压突升测试
- 输入电源电压不平衡测试
- 稳态输出电压调节测试
- 单相测试
- 浪涌电流处理测试
- SEMI F47 标准符合性测试

使用一台 200 安培容量的 EPRI PEAC 移动式电压突降发生器（Porto Sag）进行了这些测试。下面简述这些测试、步骤和结果。

测试说明

目的

特性测试的目的是：

1. 试验该装置的性能特性并验证其符合制造商的规范
2. 测定 AVC 校正突降电压的响应时间
3. 确定 AVC 能否处理由感应电机负载产生的大浪涌电流
4. 确定 AVC 电压突降保护极限值，验证其在带特定类型负载，如可编程序逻辑控制器（PLC）和电机驱动器时能否满足 SEMI F47 标准
5. 揭示对终端用户有价值的要点

步骤

图 3 示意了对 AVC 作电压突降测试的设置方式。480 V 电网馈电母线接到一个三相自耦变压器和一个 480 /208 V 降压变压器上，该变压器再与移动式电压突降发生器和 AVC 相连。然后 AVC 接到与 480V 母排相连的 208 /480 V 升压变压器上。三相线性负载接到 480 V 独立母排上。此外，一个单相工业负载箱（ILB）通过 480 /120 V 单相降压变压器接到该母排的 A 相和 B 相上。

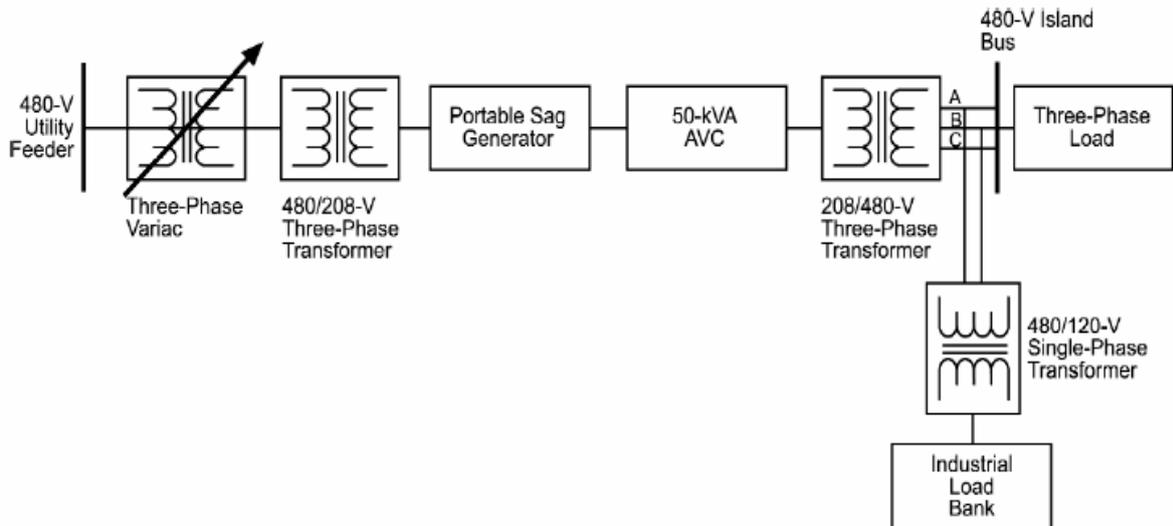


图 3. 电压突降测试安装图

开始时，AVC 被加载至额定值的 50%。移动式电压突降发生器用来产生不同幅度和持续时间的突降电压，包括 SEMI F47 标准中规定的各点（见图 4）。如果 AVC 通过了 50% 负载测试，则将负载加至最大额定负载，并按同样条件重新测试。在仅作稳态测试时，移动式电压突降发生器被旁路。对 AVC 的输入和输出作监测并纪录，以便分析。

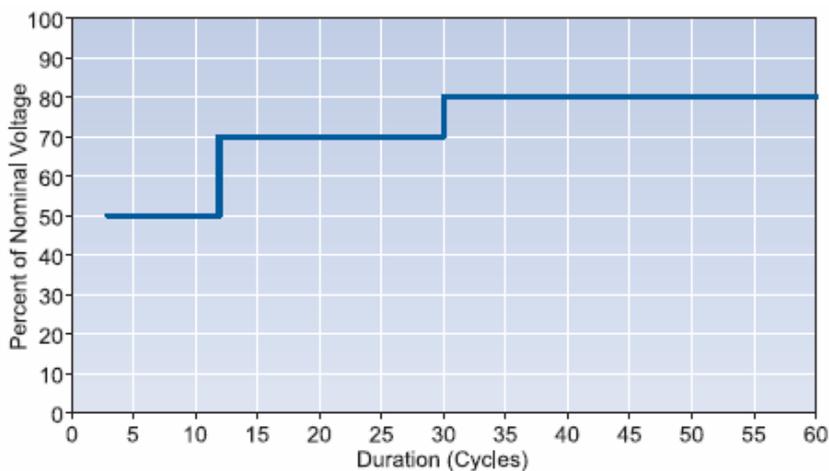


图 4. SEMI F47 标准的幅度-持续时间免疫曲线

工业负载箱是一个永久固定装置，用来演示一些典型控制部件如 PLC、继电器、接触器和电源的电压突降敏感性并显示单相电力调节器提高这些负载免疫能力的特性。用以演示保护和免疫改进的实际负载环境，工业负载箱作为一优良的测试平台来评价各种电力品质改善装置的有效性。有关工业负载箱的更多资料可以在 PQTN 摘要 44¹ 和 45² 中找到。

1、PQTN 摘要 44 号，“The Effects of Point-on-Wave on Low-voltage Tolerance of Industrial Process Devices,” EPRI PEAC Corporation, June 1998
 2、PQTN 摘要 45 号，“The Effects of Phase shift on Low-Voltage Tolerance of Industrial Process Devices,” EPRI PEAC Corporation, June 1998.

结果

本节叙述特性测试的结果及其意义。测试结果按下列顺序说明：

- 电压突降和电压突升测试及响应时间
- 输入电源电压不平衡测试
- 稳态输出电压调节测试
- 浪涌电流处理测试
- SEMI F47 标准符合性测试

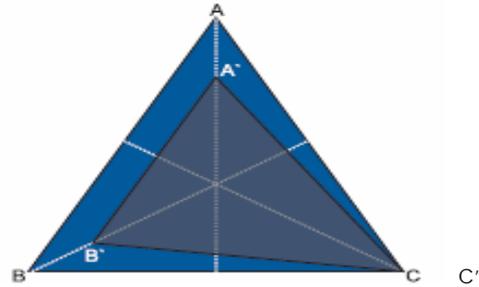


图 5、三相电压突降矢量图（三角图）

电压突降和电压突升测试结果

当电力系统出现故障或接入大负载时，可能会出现线路电压瞬时下降并持续几个周波甚至更长时间。在制造环境中，电压突降是最普遍和引起损失最大的电力品质问题之一。当电压突降严重到足以使制造过程中断，通常结果是停工、废品和费时的清理。持续几个周波的线路电压升高会使某些电子设备作出关机反应。电压突升会发生在电力系统故障期间或者在非接地系统的次级电路中。电力线路之间瞬间跨接也可能引起电压浪涌。

被测试的装置是 AVC-S 型，仅有升压功能。因此，对该机组仅作不同电压突降情况下的测试。举个典型的例子，AVC 经受 A 相对中线和 B 相对中线低至 70% 名义电压的电压突降，而 C 相对中线仍为 100% 名义电压。这就导致所有三相相间电压 V_{AB} 、 V_{BC} 、 V_{CA} 上产生电压突降，如图 5 所示，其中三角形 ABC 代表实际的相对相电压，而 $A'B'C'$ 则代表突降的相对相电压。

图 6（左）、图 6（右）和图 7 显示了 AVC 对电压突降低至 70% 名义值时的响应。图 6（左）显示 AVC 的输出电压已校正到规定的电压调节范围之内。图 6（右）显示了由于输入电压下降而引起的电流增加，这是所有带有恒定 kVA 负载的变压器的典型现象。图 7 显示了由串联变压器注入到输入电压上的电压。这些图形显示出 AVC 在不到四分之一周波（ $<4ms$ ）之内校正电压突降的能力。

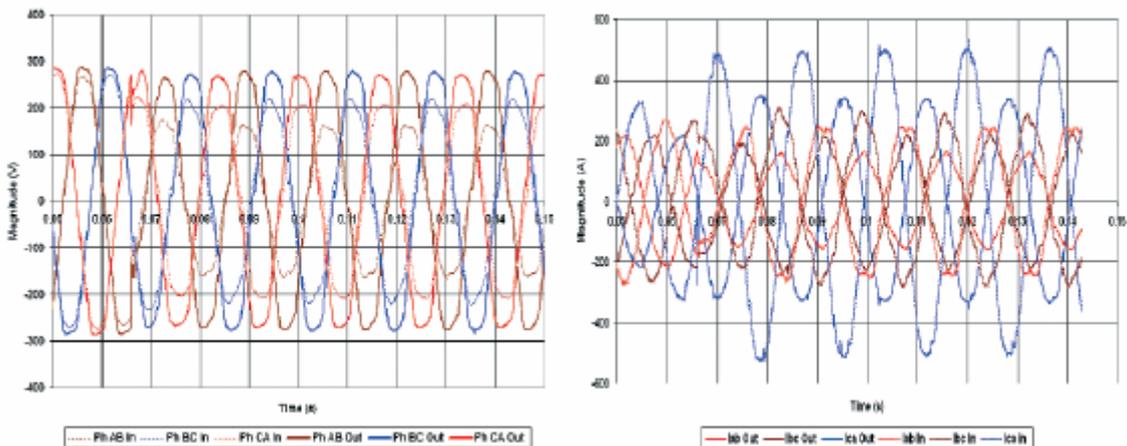


图 6. 电压突降低至 70% 名义值时电压波形（左）和电流波形（右）

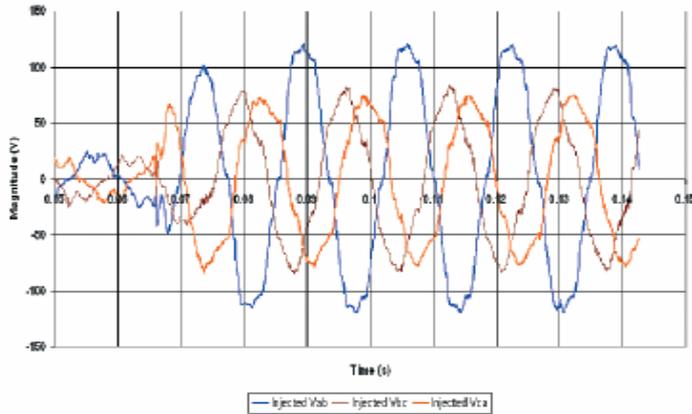


图 7.在 AVC 上由串联注入变压器所提供的校正电压

作为一个例子，让我们研究一下一台可程序逻辑控制器（PLC）的跨越特性，它被置于工业负载箱（ILB）中，通过一台480/120 V降压变压器接到A相和B相上（参见图3）。当A相和B相同时存在低至50%名义值的电压突降而C相仍保持100%名义值时，AVC能为PLC提供跨越。图8显示使用AVC后PLC跨度曲线得到改善。

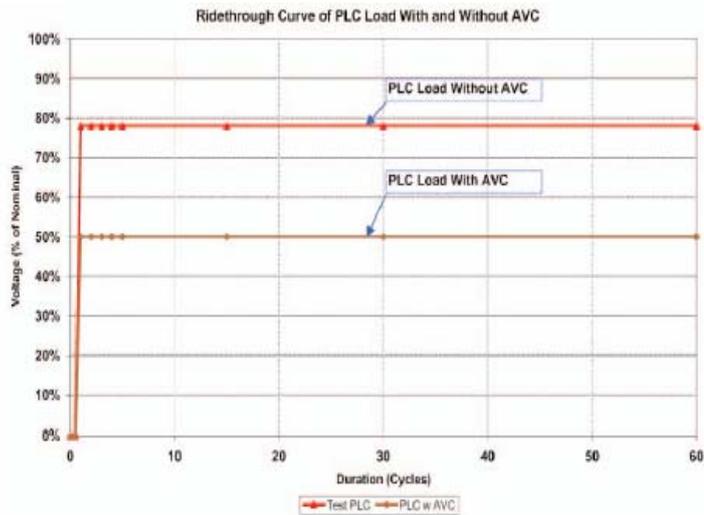


图 8. 使用 AVC 后 PLC 负载跨越特性的改善

电源电压不平衡测试结果

电压不平衡表现为三相的电压幅值不相等。ANSI C84.1 指出了 3%的稳态可接受程度。超过 3%的不平衡对于三相电机是有问题的，使得不平衡电流增加导致过热。不平衡电压是因维修卸去某组电容或者单相电压调节器发生故障引起的。此外，相间分布不均匀的负载设备也会恶化不平衡状况。在电压不平衡测试过程中，依靠三相自耦变压器的帮助，AVC 被供给 3%和 5%的不平衡输入电压，A 相电压高于名义值，B 相电压低于名义值，C 相电压为名义值，AB、BC 和 CA 为相对相。和预计的一样，AVC-S 校正了欠压不平衡，但不能校正过压不平衡。如需对欠压和过压不平衡都进行校正，则需选用 AVC-R 而不是 AVC-S。

电压调节测试结果

可能引起暂时欠压的通常原因会是系统上增大的负载、单个大容量或多个负载，或者是在电力系统设计时并没有想要接入的负载。另一个引起暂时欠压的原因是电容组切换，有意地或者由熔断的保险丝导致的。电压调节器或有载调压变压器的故障也会降低电网中某一点的电压并持续一段时间。

引起暂时过压则有好几种原因，有在市电网中产生的，也有在用户工厂内部产生的。在市网系统产生过压的一个原因可能是电压调节器或有载调压变压器的误操作。在用户厂房内，可能是功率因数调节电容器在轻载时被投入，导致电网电压升高。

AVC 的调节性能在电压突降和突升以及过压和欠压情况下都被作了测试。图 9 显示 AVC 在电压突降/突升和稳态时的电压调节特性。正如它的规格一样，当供电电压在-10%之内时，AVC 能提供在 $\pm 1\%$ 之内的连续电压调节。但是由于该 AVC 是 S 型，它不能调节电压突升和过压。

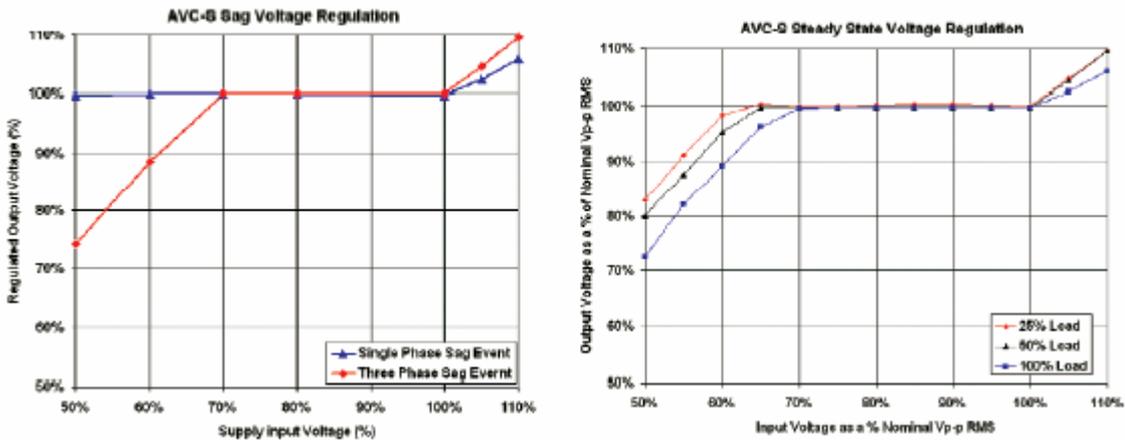


图 9. AVC 的电压突降（左）和稳态电压（右）调节特性

浪涌电流测试结果

起动一大型电动机负载或接通一变压器可能会产生浪涌电流。浪涌电流会使系统的电压产生压降，在选择电力调节器时，这是一个非常重要的考虑参数。该 AVC 的浪涌电流能力是通过起动一台 10 马力电动机来进行测试的。图 10（左）显示了当 10 马力感应电动机起动时，在 AVC 输入端录得的浪涌电流波形。图 10（右）则显示了相应的电压波形。当电流突然增加时，AVC 的输入电压有轻微的下降，但其已被 AVC 调节。

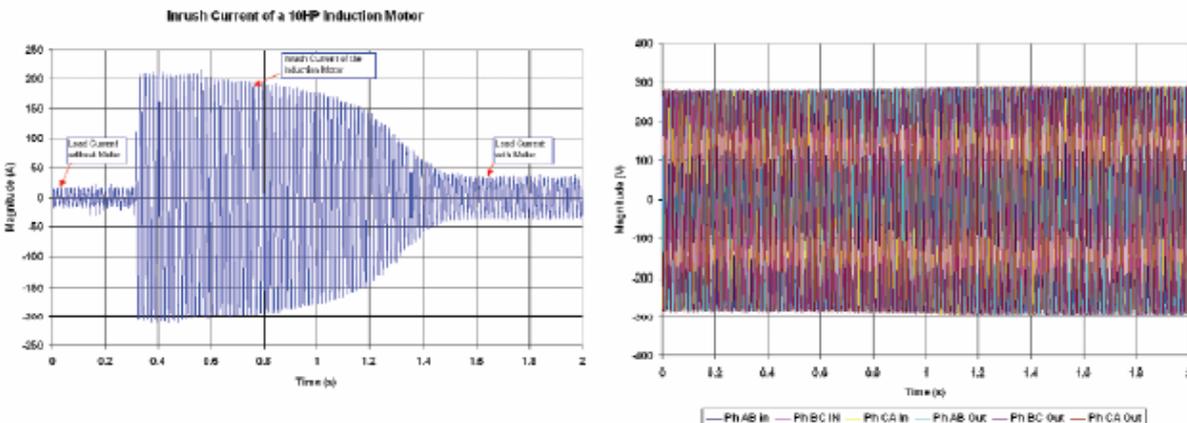


图 10. AVC 接有一 10 马力电动机的浪涌电流（左）和相应电压的波形（右）

根据电气规格, AVC 能支持 150%持续 30 秒的过载容量并有 10%的电压校正。对于一台 50kVA、208 V 的 AVC 机组, 150%过载电流容量等于 208 A_{RMS} 或 294 A_{Peak}, 如果浪涌电流在 294 A_{Peak} 以内, 那么该 AVC 就不会转至旁路模式。为了确定该 AVC 能否支持所给定的电动机负载, 下面的计算可能会有帮助。举个例子, 让我们考虑一个 10 马力的三相感应电动机 NEMA 代码 3P (从铭牌上获得的), 其堵转 (或浪涌) 容量为 13 kVA/hp。该电机的浪涌电流可按下式计算。

$$I_{浪涌-RMS} = \text{浪涌容量 KVA} / \sqrt{3} * \text{额定的 RMS 电压} = 13\text{kVA} / \text{hp} * 10 \text{ hp} / \sqrt{3} * 208\text{V}_{RMS}$$

$$= 360.85\text{A}_{RMS}$$

$$I_{浪涌-Peak} = \sqrt{2} * I_{浪涌-RMS} = 510\text{A}_{Peak}$$

浪涌电流大于 AVC 的过载容量, 如果该特定的电机在满负荷下起动时 AVC 会转为旁路模式。然而该电机仍能起动, 此时电机会直接连到市电网上。

响应时间

AVC 的响应时间就是该 AVC 从感应到输入电压降低后, 注入调节电压, 使输出电压被调节到其所规定的调节范围内所需要的时间。这对有一定切换时间的备用式电力调节器来说是重要问题, 因为有些敏感负载会在转换完成 (小于一个周波) 之前就已经跳停了。该 AVC 的响应时间测得为小于四分之一周波, 大约在 2 至 4 毫秒之间。

SEMI F47 标准符合性测试结果

在 EPRI PEAC 实验室中所作测试的结果表明, 该 AVC 能够有效地减小电压突降的影响, 并符合 SEMI F47 标准。图 11 表示出一台 40%电压突降校正的 AVC 机组 (该机组保护一台 PLC) 在满负荷条件下的电压突降处理能力。该图也显示出 SEMI F47 的跨越曲线。出现在该曲线上方的电压突降都不会影响半导体设备的运行。而发生在该曲线下方的电压突降可能会影响设备的运行。虚线表示一台由 AVC 保护的 PLC 的跨越曲线。该特定的 PLC 在电压突降至 80%名义值且持续 1 个周波时就跳停。这是工业上最敏感的设备之一, 而这条曲线就是在这个设备的跳停水平上建立起来的。请注意, 使用了 AVC 后该 PLC 就不跳停了, 除非输入电压跌至 50%以下。因此, 即使对最敏感的负载, 使用 AVC 也能明显的改善其压降跨越能力, 同时使其满足 SEMI F47 标准要求。

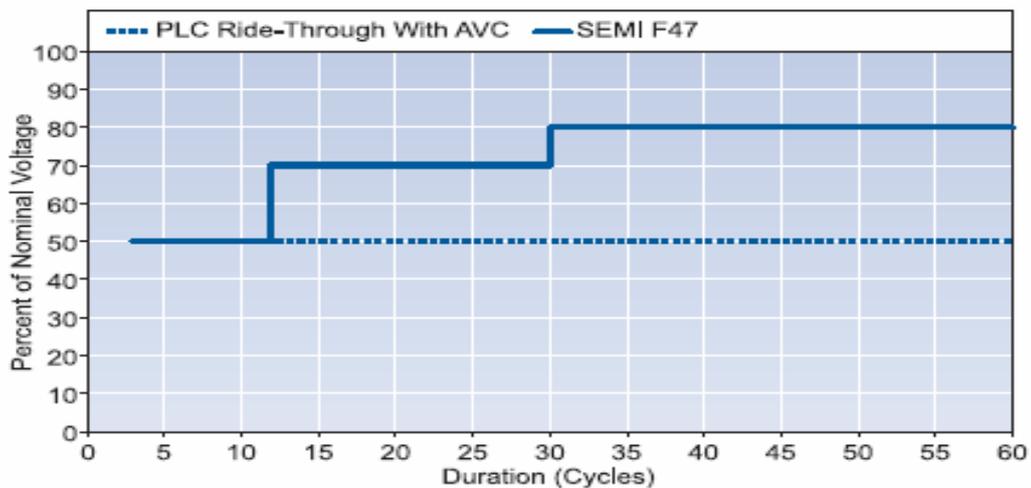


图 11. SEMI F47 和受 AVC 保护的 PLC 的跨越曲线

快速电压调节器的应用

多了解你的设备来降低解决方案的成本

瞬间电压变化是影响工业用户的最常见的电力品质问题。有各种各样原因会引起电压跌落，包括临时掉电、短路、负载切换及电力波动。因为这些电压变化，工业用户遭遇到了很多问题，例如：

- 接触器跳脱
- 变速驱动器跳闸
- PLC 跳停
- 保护继电器误动作

所有这些事件都会造成生产过程意外停止。大多数情况下，防止因电压小幅波动引起的停机或接触器跳脱就能为厂家节省大量的金钱。这可以通过使用抗压降装置来实现，它可以保护敏感负载免受瞬间电压波动的影响。可被给予系统的最好保护是电网级别的解决方案，但是这种解决方案的相关费用是数十万美圆级。在工厂内部，只对控制级别进行少得多的保护也是可行的，但这需要对工艺和设备有更多的知识。如果能充分了解工艺过程，就可以应用较小型的且价格较低的电力调节器。对工艺设备的研究，会让你认定 AVC 是一个非常可行的选择。

AVC 的典型应用

AVC 是一种三相电力品质改善装置，用来保护关键的工艺设备免受电压干扰的影响。其容量范围很广，从 25kVA 的小负载到高达 10MVA 的系统级负载。AVC 可用于生产过程级别的保护以及系统的保护，这取决于工厂中问题的本质。此外，AVC 符合用于半导体工业来保证设备跨越能力的 SEMI F47 标准。最近刚安装了 AVC 的一些工厂是半导体生产和切割厂、晶体生长厂、报纸印刷厂、瓶装厂、塑料挤压厂、PVC 管制造厂和汽车焊接厂。一些由 AVC 保护的典型设备是可调速的 AC/DC 驱动器、恒速电机、照明装置、接触器和 PLC。

图 12 示意了一种 AVC 的典型应用。客户可根据自己工厂所遇到的问题本质来决定选用 AVC-S（标准型）还是 AVC-R（增强型）来保护其关键负载。AVC 并不提供 UPS 式的完全停电保护，但是它效率更高、体积更小、价格更低，而且在大容量应用时往往更加适合。在这种情况下，AVC 通常用于保护工厂的基本负载和关键负载免受电压干扰的影响。

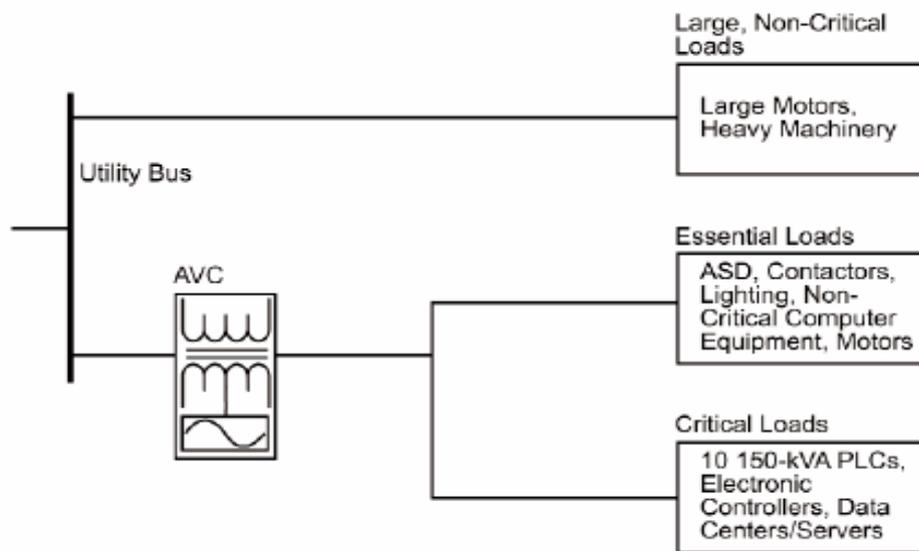


图 12. AVC 的典型应用

应用中的关键点

下面的章节讲述在为特定应用选购 AVC 之前应先被用户考虑的几个要点。对有些案例，基于性能特点和客户需要，可能有其他装置更适合于该应用。下面是与本装置有关的几个应用中的关键点。

星形连接负载

如果负载是三相四线系统，那么 AVC 之后可包含一个 Δ -Y 变压器。但是三相三线负载就不需要 Δ -Y 变压器。

升压补偿或降压抵偿/升压补偿工作方式

标准型 AVC-S 的注入变压器含有升压补偿部件。增强型 AVC-R 的注入变压器中还有一个附加的降压抵偿部件。如果工厂只有通常的电压突降和极少的电压突升，那么就选用 AVC-S 型。在电压突升产生更多问题的地方，那就应安装 AVC-R 型。

过载问题

当工作在零电压校正状况下，对于逆变器控制在高达 150% 的每相系统额定暂态电流过载状态，AVC 能连续运行。如果要 AVC 作电压校正，那么 AVC 系统的暂态和连续负载的额定值就要按过载时的校正程度成比例地降低。例如，当 AVC 根本不作校正时，它提供 150% 的过载；当它正在对 70% 名义值电压突降进行校正时，它此时的过载能力就降到 120%。如果 AVC 所承担的负载水平超过逆变器的最大额定值或者计时的过载程度被超过，AVC 系统就会切换到静态旁路模式。没有储存机制来维持过载或用作电压校正。

遇到逆变器过载时，静态开关会把串联注入变压器的次级（逆变器侧）短接，有效地将系统旁路，把市电直接加到输出端而不会中断。一旦过载情况消除，系统会自动回到正常的基于逆变器的运行且没有中断。

其他要点

在 AVC 特性测试期间，发现在某些三相压降低至 0% 名义值的测试时，AVC 转到旁路模式。负载在 AVC 切换到旁路的过程期间却不会跳掉。应注意到，在旁路模式下 AVC 被旁路且负载是直接接到市电上。当电压恢复后，机组会自动从旁路模式回到工作状态。如果 AVC 的温升超过限定值，那么它会转到需手工重新起动的旁路模式。如果 AVC 安装在远处而且在旁路模式时没有向客户发出报警，这可能会是一个问题。但是如果客户要求，也可以向系统监测面板发送一个指示 AVC 在旁路模式的信号或者安装一报警装置来解决这个问题。

与类似电力调节器的比较

表 1 表明 AVC 的性能特点与其他三相电力品质改善装置的性能比较。每一种都有其优缺点，并且其用途也是按应用而定。为了恰当地表述 AVC，用户必须研究其生产过程并获取需要保护的设备的知识。

表 1. 不同三相电力品质改善装置的比较

技术	跨越时间(秒)	保护范围 (突降深度)	主动电压调节	主动电流谐波补偿
快速电压调节器 (AVC)	30	50% (三相) 25% (单相)	±1%高达 10% (三相连续校正) ±2.5% (30%三相校正)	无
CAT UPS/Caterpillar active power	15	0%	有	有
飞轮 UPS/Piller	12	0%	±1%(稳态对称负载) ±5%(动态, 50%负载变化)	谐波衰减>99% (输入对输出及输出对输入)
飞轮 UPS/Hitec(带柴油机)	2 (最小)	0%	1% (稳态) 5-10% (动态)	最大 4% (线性负载时的谐波畸变)
飞轮 UPS/Precise Power (Written-Pole MG set)	12	0%	±5%名义电压	不适用
DySC/Soft Switching Inc	0.25	50%	+5%到 -10%名义电压	不适用

总结

被测试的 AVC 是一种基于逆变器的三相电压突降改善装置。输入电压在±10%内变化时，它可提供连续的±1%的电压调节。它具有不同的额定容量，从保护小型到中型负载的 25kVA 到为制造工厂提供系统级保护的 10MVA。虽然它不能在输入电压低至 0%名义电压的持续中断下为重要负载提供保护，但它能在输入电压低至 50%名义值的电压突降下为负载提供卓越的保护。它可以有效地处理电压突降而不用任何能量储存装置。此外，当工作在零电压校正状况下，对于逆变器控制在高达 150%的每相系统额定暂态电流过载状态，AVC 能连续运行。它也符合 SEMI F47 标准，严格的半导体工业标准。

它的典型应用包括但不限于：ac/dc 驱动器、恒速电机、可程序逻辑控制器和多种其他工业的接触器及继电器。目前，正在使用 AVC 的一些行业是塑料、玻璃和 PVC 制造厂、半导体制造和切割厂、晶体生长中心、水处理厂和汽车焊接厂。在 EPRI PEAC 实验室所做的测试验证了 AVC 制造商的规范。总的来说，对于那些寻找低维护、无储能的三相电力品质改善装置来保护他们的系统和生产过程不受电压波动影响的客户来说，AVC 是一个好的选择。

要获得更多信息请联系：

B.Vairamohan, EPRI PEAC Corporation, phone: 865.218.8065,

Email: bvairamohan@epri-peac.com

关于 EPRI

EPRI 为全球的能源和能源服务业创造科学和技术的解决方案。美国的公用电力网在 1973 年建立了电力研究院 (EPRI)，作为非营利的研究团体为电网成员、他们的客户和社团的利益服务。现在被简称为 EPRI，该公司为 40 个国家的 1000 多个与能源相关的组织机构提供广泛的创新产品和服务。EPRI 的多学科的科学家和工程师队伍从全世界的技术和商业网络中汲取专家意见和专门技术来帮助解决当今最头痛的能源和环境问题。

EPRI 使世界电气化