

## 如何为超级电容器组的储能进行充电

### 引言

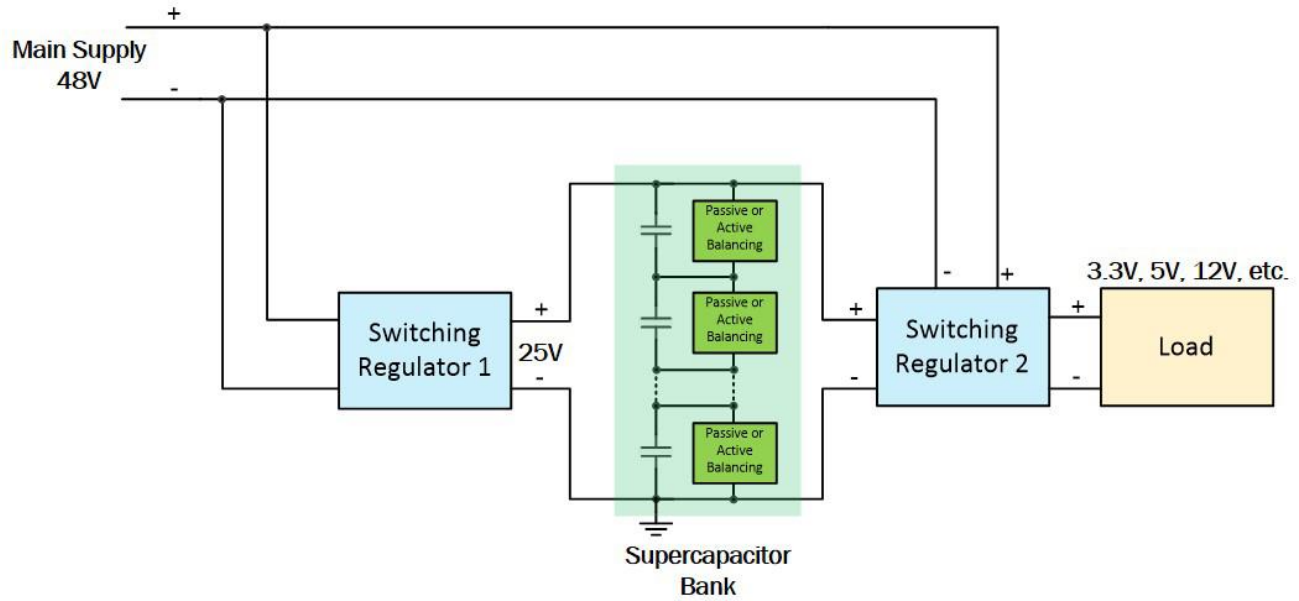
超级电容器（supercapacitor, SC）也被称为超电容器（ultracapacitor）和双电层（electric double-layer）电容器，通常用在各种[电源管理](#)应用当中。在汽车应用中，如带有再生制动的启动-停止系统，SC 能够提供重新启动内燃机时啮合（engage）起动机所需的能量，同时接受制动期间回收的动能。超级电容器有很多好处，因为它们被充电和放电的次数能够显著多于传统铅-酸电池，并且也能够更迅速地吸收能量，而不会降低其预期寿命。这些能力也使得 SC 对于工业备用电源系统、快速充电无绳电动工具和远程传感器具有很大的吸引力，为这些应用频繁更换电池是不切实际的。

本文介绍了与这些大电容充电相关的各种挑战，并告诉电源系统设计人员如何为后备储能评估和选择最佳的系统配置。它通过所提供的波形和详细解释，来对 SC 充电器解决方案进行解析。

### 系统阐述

在许多系统配置中都使用了超级电容组作为后备储能装置。要开始使用，设计人员需要聚焦其能量存储配置，然后再决定能量在什么电压上进行能量存储。解决方案的选择依赖于负载的功率和电压要求，以及 SC 的能量和电压能力。一旦确定了最好的解决方案，必须做出整体性能与成本之间的权衡。

图 1 示出了一种高效率解决方案的原理框图，其中的负载是需要调节输入电压（3.3V、5V、12V 等）的器件。48V 主电源为正常运行中的开关稳压器 2（SW2）供电，而同时通过开关稳压器 1（SW1）以 25V 电压为 SC 组充电。当主电源断开时，则 SC 组为 SW2 供电，以保持负载在不中断的前提下运行。



图字：主电源 开关稳压器 1 无源或有源平衡 无源或有源平衡 无源或有源平衡 超级电容器组  
开关稳压器 2 3.3V、5V、12V 等 负载

图 1：使用超级电容器组的电池后备系统范例框图

## 系统设计与挑战

一旦选择了一种 SC 单元，系统设计人员就必须选择将每个 SC 单元被充电时的目标电压，这是基于 SC 的额定曲线来完成的。在室温条件下，大部分 SC 单元的额定值都是 2.5V 至 3.3V——这个额定值处于较高的温度范围，并具有较长的预期寿命。通常，目标电压的设置应该低于最大额定电压，以延长 SC 工作寿命。

接下来，可以选择 SC 组和 SW2 拓扑电路所需的理想电压，SC 组配置可以是并联、串联或并联的串联组合。由于单元的额定电压通常在 3.3V 以下，而负载通常需要等于或高于电源电压，单元配置和 SW2 的选择将使用一种带升压转换器的单个单元模式，或者一种带降压或降压-升压稳压器的多个单元串联模式。如果要使用升压拓扑结构，我们必须确保随着 SC 放电，电压不降低到低于 SW2 的最低工作输入电压。这个高压可能高达 SC 的充电电压的一半，同时基于这个原因，我们还将分析一个针对 SW1 的 SC 组，它由 SC 和一个简单的降压稳压器串联组合而成。然后，如果为了满足能量要求的需要，应该并联放置多个串联串。

如果选择了 SC 串联组合模式，所使用的单元数目必须根据串的最高值的最大所需电压来选择。更多电容器的串联意味着 SC 串电压更高、电容值更低。例如，可以考虑选择使用两串四个 2.7V 10F 的电容器，也可以选择一串八个（串联）同样的电容器。在可以存储相同总电荷和能量的同时，串的可用电压范围使单串更有优势。例如，如果有一个负载需要 5V 偏压，在考虑到其最大占空比和其他跌落（dropout）因素后，SW2 所需的电压为 6V 左右。

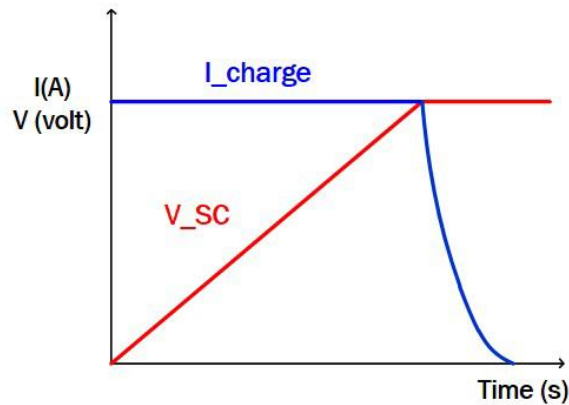
- 电容器中的能量为  $W = CV^2/2$ ，而可以使用的能量为  $W = C/2 (V_{\text{charge}}^2 - V_{\text{discharge}}^2)$

- 两串四个电容器的可用能量为  $W = 2 * [ (10F/4) / 2 * ( (2.7V * 4)^2 - 6V^2 ) ] = 201.6J$
- 单串八个电容器（串联）的可用能量  $W = 1 * [ (10F/8) / 2 * ( (2.7V * 8)^2 - 6V^2 ) ] = 269.1J$

由于两个电容器组都可以存储相同的总能量，较低电压的串有更大百分比的浪费/不可用电荷。在这种情况下，较高串电压有利于充分利用 SC。

在考虑如何对 SC 组充电时，第三个系统挑战出现了。起初，当 SC 电压为 0 时，由于高电容的缘故，SW1 必须在相当长的一段时间内工作在一种类似于输出短路的状态下。一个常规的 SW1 可能会卡在打嗝 (hiccup) 模式，而无法为 SC 充电。为了保护 SC 和 SW1，在充电阶段的开始时，必须要有额外的电流限制功能。针对 SW1 的一个好的解决方案是在几乎没有输出电压的情况下，在更长时间内提供连续的充电电流。

现在有各种方法为 SC 充电。如图 2 (CICV 曲线) 所示的恒定电流/恒定电压 (CICV) 是较常用的和优选的方法。在充电周期开始时，充电器件 (SW1) 在恒定电流模式下工作，为 SC 提供恒定的电流，使得其电压线性增加。SC 被充电到目标电压后，此时恒定电压环路被激活，并准确控制 SC 充电等级保持恒定，以避免过度充电。同样，这种首选解决方案提出了电源管理功能要求，这需要考虑。



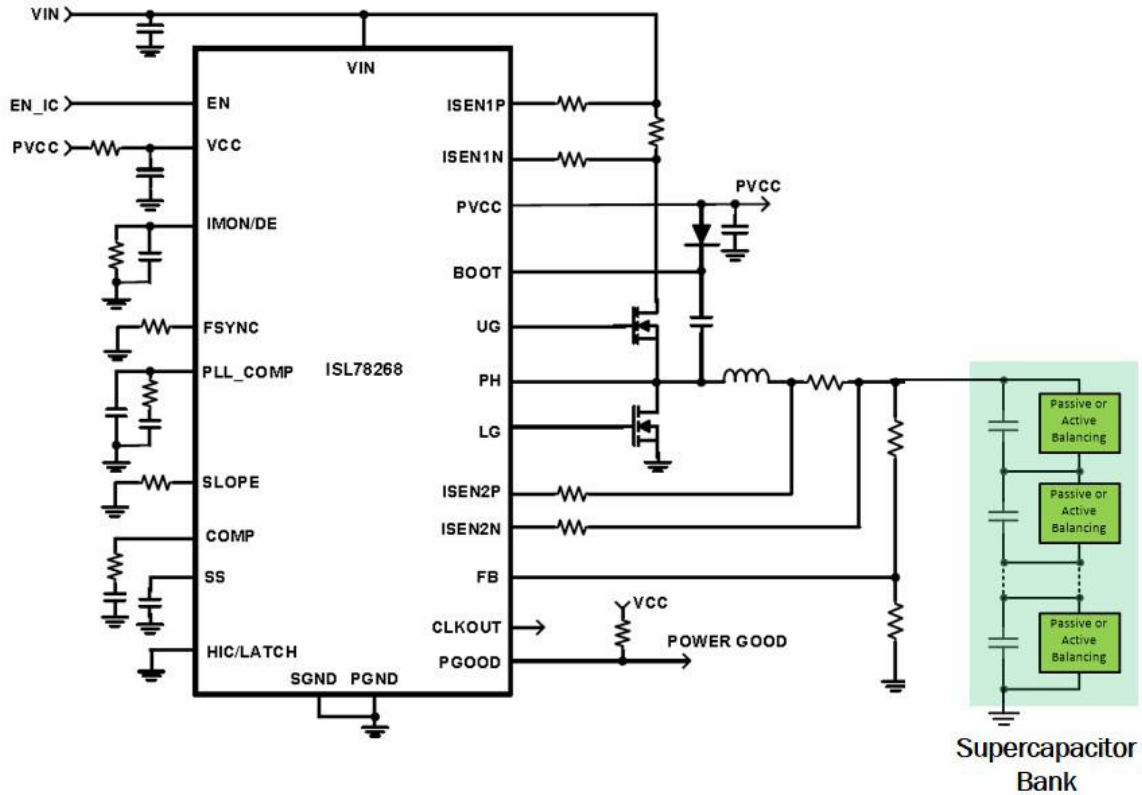
图字：时间（秒）

图 2：CICV 超级电容器充电控制

返回到图 1 的例子，在主电源为 48V，SC 组电压为 25V，而负载电压为 3.3V、5V、12V 等时，一种同步降压功能对于 SW1 和 SW2 都是适当的。伴随与 SC 充电相关的主要挑战，SW1 的选择至关重要。针对 SW1 的理想解决方案应该需要电源管理功能，它能够以高输入（48V）和输出（25V）电压运行，同时也可提供 CICV 稳压功能。

## 超级电容器充电器解决方案示例

为了演示 SC 充电行为，我们将以一个同步降压稳压器为例。我们将介绍主要问题和解决方法，并用实验波形来帮助我们理解。



图字：无源或有源平衡 无源或有源平衡 无源或有源平衡 超级电容器组

图 3：一种可实现 CICV SC 充电控制的同步降压稳压器的简化原理图

图 3 显示了 Intersil 的 ISL78268 的简化原理图，它控制了一个可实现 CICV 控制的同步降压型稳压器。为了用 CICV 控制将超级电容器组充电至 25V，在选择控制器时应该考虑下列功能：

1. 同步降压控制器运行的电压为  $V_{IN} \geq 48V$  和  $V_{OUT} \geq 25V$ 。
2. 在不同调节模式之间自动转换的恒定电流和恒定电压调节功能。
3. 运行在高于系统电源电压，为恒流部分提供的精确电流监测输入。参照图 3，控制器正在感知监测电感传感器的连续电流，这就是充电电流。控制器的电流监测放大器必须能承受共模电压，在这种情况下其值为 25V。

图 4 示出了 ISL78268 同步降压控制器的功能框图的一小部分。如图所示，共有两个标记为 Gm1 和 Gm2 的独立的误差放大器，用于调节恒定电压（Gm1）和恒定电流（Gm2）。

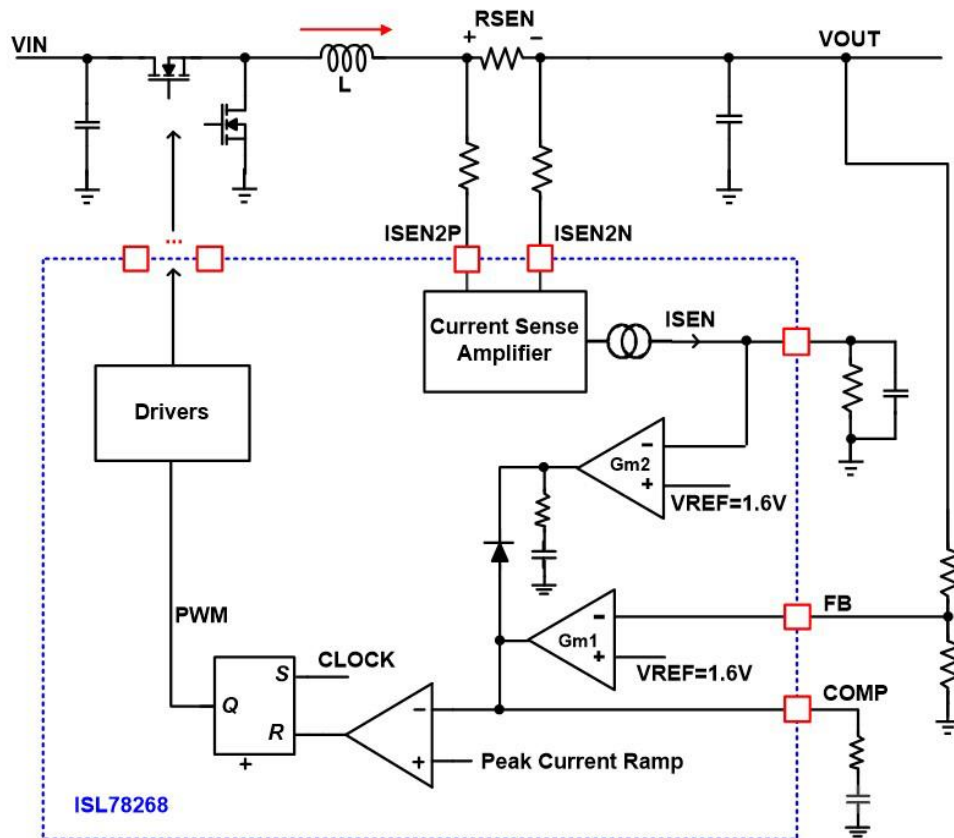
误差放大器 Gm1 的作用是恒定电压（CV）闭环控制。它比较 FB 上的反馈电压与内部 1.6V 参考电压，并在 COMP 引脚创建一个误差电压。FB 引脚连接到一个来自输出电压的电阻分压器，并进行设置，在输出处于所需电压时的 FB 为 1.6V。COMP 电压则表示所需输出电压和实际输出电压之间的差。然后 COMP 与峰值电感斜坡进行比较，以产生 PWM 信号来控制输出电压保持恒定。

误差放大器 Gm2 的作用是恒定电流（CI）闭环控制。它比较 IMON/DE 引脚电压与内部 1.6V 参考电压，并

在 COMP 引脚创建一个误差输出。IMON/DE 引脚电压由内部产生，代表平均输出电感器负载电流。因此，当 Gm2 环路被激活时（在 Gm1 和 Gm2 的输出端之间的二极管可有效选择哪个环路处于激活状态），COMP 电压表示了所需输出电流和实际输出电流之间的差。然后 COMP 与峰值电感斜坡进行比较，以产生 PWM 信号来控制输出电流保持恒定。

在 SC 电压达到其目标值之前的充电开始阶段，Gm2 处于支配性地驱动 COMP 引脚，产生 PWM 输出以实现 CI 控制。当 SC 电压被充电到目标值时，充电电流被减小，从而引起 IMON/DE 引脚电压降低，CI 环路断开（此时 IMON/DE < 1.6V），而 CV 环路自然接管了 COMP 控制权，从而控制输出电压保持恒定。

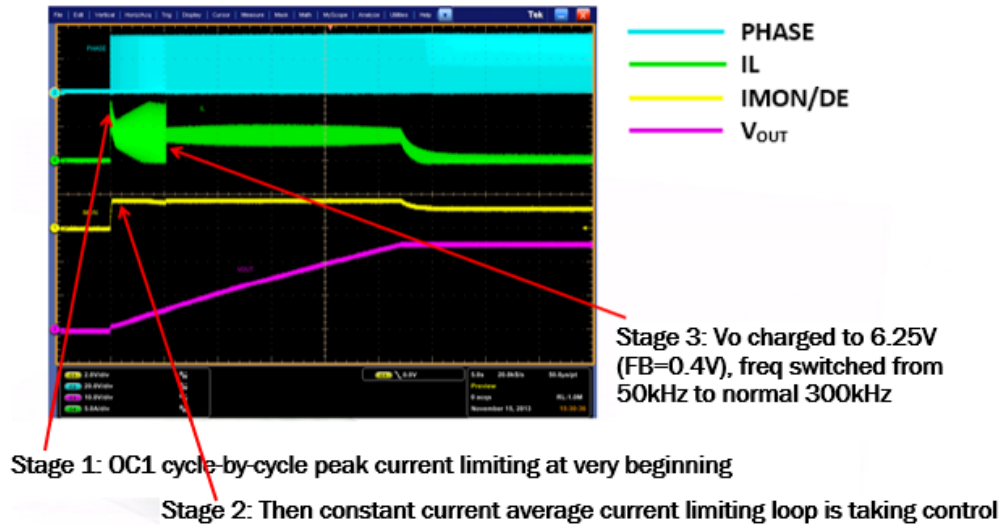
ISL78268 降压控制器同时具有用于 PWM 生成（可靠的逐周期峰值电流调制器）的峰值电流模式控制，以及适用于 SC 充电的外部恒定平均电流环路。



图字：驱动器 电流检测放大器 峰值电流斜坡

图 4：ISL78268 CICV 环路简化框图

现在，我们将重点介绍实现 SC 充电的实施方案。图 5、图 6 和图 7 显示了由 ISL78268 同步降压控制的 SC 组（串联的 12 单元 50F/2.7V SC）在充电时的实验波形。SC 将由主电源充电到 25V。



图字：第一阶段：一开始的 OC1 逐周期峰值电流限制

第二阶段：然后恒定电流平均电流限制环路接管控制权

第三阶段： $V_o$  被充电到 6.25V (FB=0.4V)，频率从 50kHz 切换到 300kHz

图 5：SC 充电时的实验波形

图 5 示出了 SC 充电有几个阶段。首先，在第一阶段中， $V_o$  几乎为 0。ISL78268 的 IMON/DE 引脚上的平均电流信号尚未达到 1.6V（所需充电电流的参考值），所以 CI 环路尚未啮合。在这个阶段中，电感器的峰值电流被逐周期限制为固定 OC 阈值。在充电状态开始阶段中，当  $V_{OUT}$  为低 (FB<0.4V) 时，开关频率被箝位在 50kHz，作为一种预防措施来克服提到的为将峰值电流限制在低  $V_{OUT}$  时的电感失控问题。

图 6 显示的是一种放大的第一阶段波形。当 IMON/DE 引脚电压（黄色轨迹）达到 1.6V 时，第二阶段随即开始。在这里，CI 环路闭合并拉动 COMP 信号（蓝色轨迹）下降，因此开始调节输出电流，并使 IMON/DE 引脚电压保持恒定。IMON/DE 引脚电压代表监测到的平均输出电流信号。IL 波形（绿色轨迹）示出了在第二阶段期间平均电流被控制为恒定值。输出电压（粉红色轨迹）表示 SC 被恒定充电电流线性充电。

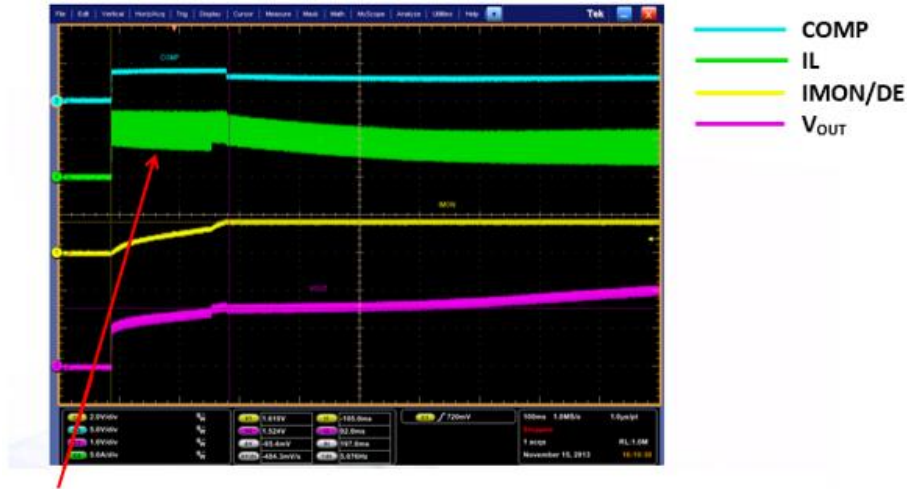


图5: OC1 cycle-by-cycle peak current limiting at very beginning

图字: 第一阶段: 一开始的 OC1 逐周期峰值电流限制

图 6: 第一阶段中 SC 充电的放大实验波形

当 FB 引脚检测到 0.4V 时, 第三阶段开始 (图 7)。检测完成后, 恒流调节将如我们所知那样被完全啮合, 因此开关频率可以被自动调整到设定的 300kHz 频点。利用较高的开关频率, 可以显著地减少电感器电流纹波 (绿色轨迹)。输出电压 (粉红色轨迹) 不断线性增加, 表明 SC 正在被线性充电。



图字: 第三阶段: Vo 被充电到 6.25V (FB=0.4V), 频率从 50kHz 被切换至正常的 300kHz

图 7: SC 充电的实验波形

返回到图 5, 在 Vo 达到 25V 的目标电压之前, 第三阶段都在进行。一旦发生这种情况, CV 环路啮合并调节输出电压; 平均电流环路断开。图 5 示出了输出电压 (粉红色轨迹) 呈平稳状态 (levels off), 而电感器电流下降到低电平。IMON/DE 引脚代表的平均充电电流也在下降, 标志着恒流调节的结束。

## 结论

超级电容器已被用作某些汽车、工业和消费产品的能量存储解决方案，因为它们可提供优于传统电池的固有物理特性。为了最大限度地提高 SC 组的能量存储量，通常最好串联堆叠几个 SC 单元来实现高的组电压。在充电时，最好使用一种 CICV 充电方法来限制高电流，否则由于 SC 的低 ESR，如果充电到一定电压，将引起高电流流动。恒定电流使 SC 内部的充电损耗可以控制，从而能够减少热量的产生，并延长 SC 的寿命。因此，对于充电电路而言，能够承受高电压和提供 CICV 调节能力是颇具优势的。如希望了解更多关于 Intersil 面向超级电容器充电的同步降压控制器的相关信息，请访问 [www.intersil.com/isl78268-buck-controller](http://www.intersil.com/isl78268-buck-controller)。

# # #

### About Renesas Electronics Corporation

Renesas Electronics Corporation delivers trusted embedded design innovation with complete semiconductor solutions that enable billions of connected, intelligent devices to enhance the way people work and live—securely and safely. A global leader in microcontrollers, analog, power, and SoC products, Renesas provides the expertise, quality, and comprehensive solutions for a broad range of Automotive, Industrial, Home Electronics, Office Automation and Information Communication Technology applications to help shape a limitless future. Learn more at [renesas.com](http://renesas.com)

+1 408-432-8888 | © Renesas Electronics America. All rights reserved. Renesas & Intersil (and design) are trademarks owned by Renesas Electronics Corporation or one of its subsidiaries. All other trademarks mentioned are the property of their respective owners.