第 4 代 LLC 电流谐振 IC“FA6C00 系列”

“FA6C00 Series” 4th-Generation LLC Current Resonant Control ICs

小林 善则 KOBAYASHI, Yoshinori　田中 公德 TANAKA, Kiminori　森本 敏光 MORIMOTO, Toshimitsu

近年来，电子设备用开关电源被要求提高效率和降低系统成本。为此，富士电机开发了可在轻负载时改善效率、削减电源部件的第 4 代 LLC 电流谐振控制 IC“FA6C00 系列”。该系列在数 W 至数十 W 的轻负载领域采用高频突发脉冲控制技术，效率比以前的产品提高了约 10%。另外，采用谐振电流相位比控制，通过提高输出响应特性，相位补偿部件比以前的产品减少了 7 件。通过使用本 IC，可以提高 75 ～ 300 W 范围的 LED 照明用电源和工业级标准电源、液晶电视等民用电源的效率，降低系统成本。

Switching power supplies for electronic devices are being required to improve efficiency and reduce system costs. Fuji Electric has developed the “FA6C00 Series” 4th-generation LLC current resonant control ICs, which improve efficiency at light loads and help reduce the number of power supply components. This series uses high-frequency burst control at light loads, several watts to several tens of watts, thereby improving efficiency by about 10% compared with conventional products. Furthermore, it utilizes resonant current phase ratio control to improve output response characteristics, reducing seven phase compensating parts. Using these ICs allows users to improve the efficiency in 75- to 300-W equipment, such as LED lighting power supplies, standard industrial power supplies, and consumer power supplies for LCD TVs, while reducing their system costs.

1 引言

用于电子设备的开关电源不仅要求降低成本，还要求提高效率、降低干扰。因此，在输出功率 75 ～ 300 W 级别的开关电源中，对高效率化和低干扰化有效的 LLC 电流谐振电路得到了广泛使用。

此前，电源待机时的功耗在数百 mW 以下。但是，随着 IoT (Internet of Things) 的普及，各种电子设备开始连接互联网，待机时的功率增加至与轻负载相当的数 W 至数十 W。因此，要求电源效率也要提高至相当于轻负载时的程度。

此前，针对 LLC 电流谐振控制电路，富士电机推出了可应对 AC85 ～ 264 V 的大范围输入电压、构成小型电源系统的 LLC 电流谐振控制 IC“FA5760”，低待机电力的“FA6A00”，以及可减少开关电源的部件数量并内置自动切换至待机模式功能的“FA6B20”。

此次，富士电机开发了可进一步改善电源系统轻负载时的效率和削减电源部件的第 4 代 LLC 电流谐振控制 IC「FA6C00 系列”（**图 1**）。

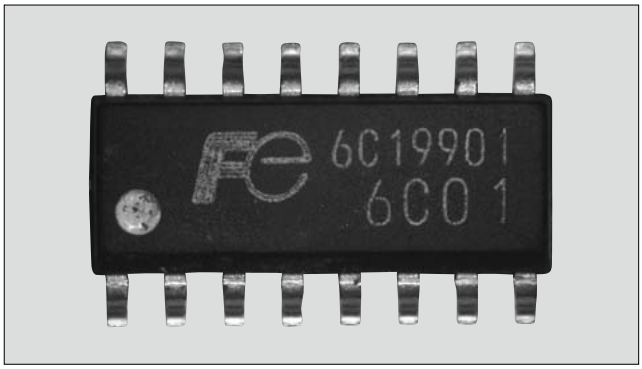

图 1　第 4 代 LLC 电流谐振控制 IC

本文将对 FA6C00 系列的概要、特点以及应用效果进行说明。

2 产品概要、特点

在传统产品所具有的低待机电力特点的基础上，本产品还可通过高频突发脉冲控制技术，降低轻负载时的噪声，在较大的负载范围内提高效率。

另外，采用谐振电流相位比控制这一新型控制方式，通过提高输出响应特性，可削减稳定运行所需的相位补偿部件，降低电源系统的成本。

通过使用本产品，可以提高包括 75 ～ 300 W 范围 LED 照明在内的电源和工业级标准电源、液晶电视等民用电源的效率，降低系统成本。**图 1** 所示为 FA6C00 系列的外观，**图 2** 所示为框图，**表 1** 所示为主要规格。

FA6C00 系列由控制 LLC 电流谐振电路的控制电路、可直接驱动半桥电路的高侧开关器件 MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) 的 780 V 耐压驱动电路以及用于以低功耗启动 IC 的 650 V 耐压启动器件构成。

封装采用了符合 JEDEC 标准的 16 针 SOP (Small Outline Package)。

高侧和低侧的双输出以 50% 的占空比交替动作，通常最大以约 250 kHz 的频率动作。

此外，第 9 端子的功能可从电源正常信号输出 (PGS 端子)、基于外部信号的保护信号输入 (MODE 端子)、热敏电阻连接 (OTP 端子) 中选择。

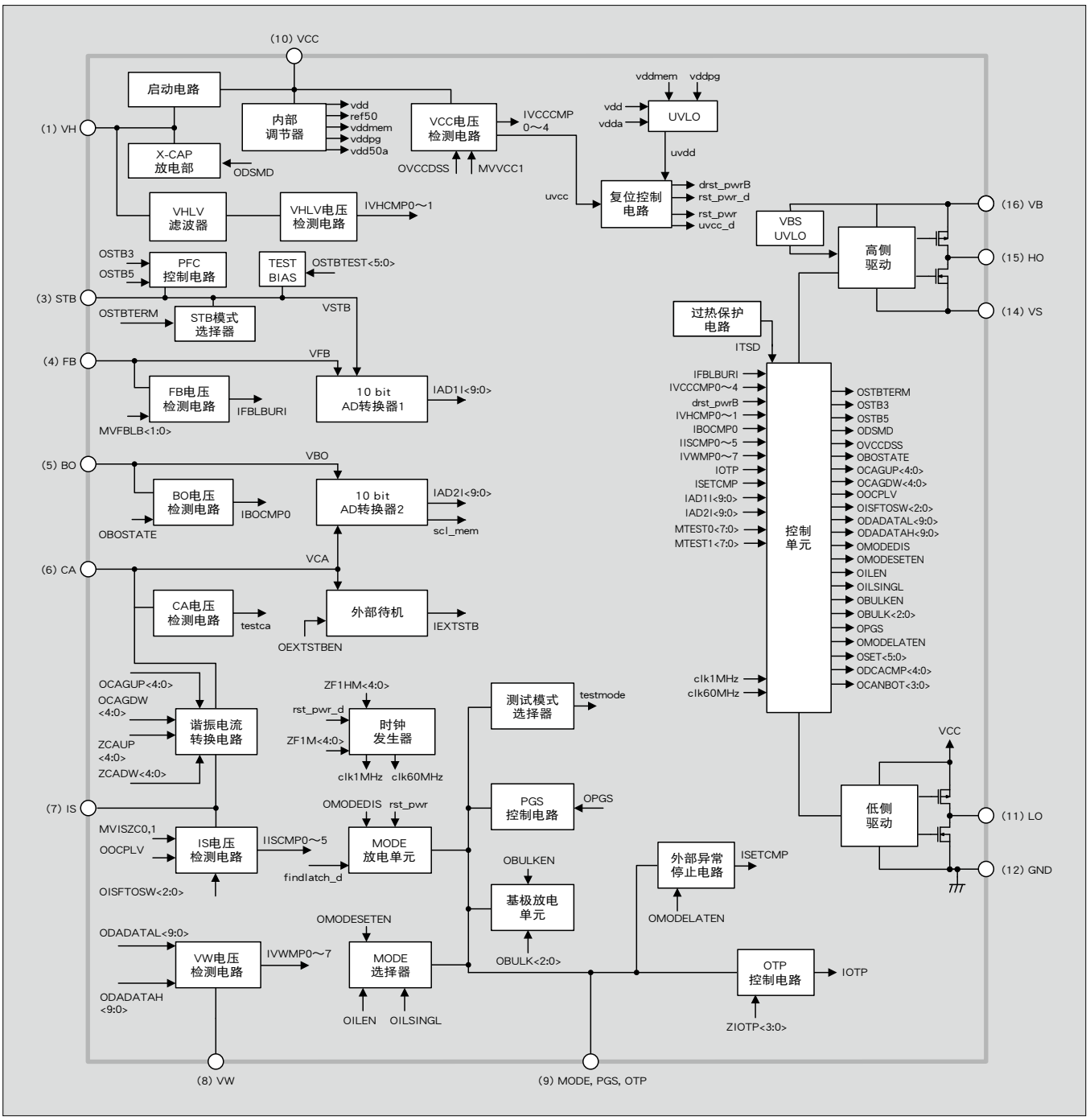

图 2 “FA6C00 系列”的框图

表 1 主要规格

项目	额定值
高侧电源对地电压	−0.3～+780 V
高侧电源对地电压 V_{BS}	−0.3～+30 V
低侧电源电压 V_{CC}	−0.3～+40 V
VH 端子输入电压	−0.3～+650 V
轻负载效率 （P_o=11 W）	78.9%
动作结温（因序列而异）	−40～+150 ℃
	−60～+150 ℃

3 主要功能与特性

3.1 高频突发脉冲控制

现有的动作方式包括连续进行开关控制的正常动作和有意设置开关停止期间进行突发脉冲控制的待机动作。此外，还具有监视输入电流，自动切换这两个动作的自动待机功能。具体而言，本功能通过 IS 端子检测初级侧的 LLC 电流谐振电路的谐振电流，通过电容器使 CA 端子的电压保持平滑，检测次级侧的负载量，切换这两个动作方式。但是，如果在负载为 5 ～ 30 W 左右的范围内连续进行开关控制，则会发生变压器的励磁电流导致效率恶化的问题。另一方面，如

果为提高效率而进行突发脉冲控制，则谐振电流的峰值变大，导致输出电压的纹波也变大。其结果，会带来负载端机器发生误动作的问题。此外，因突发脉冲序列周期变快，还存在电源变压器产生噪音的问题。因此，为了在抑制轻负载范围的输出电压纹波和变压器噪音的同时提高效率，FA6C00 系列在连续开关控制与突发脉冲控制（低频突发脉冲控制）动作的负载范围之间，新采用了高频突发脉冲控制技术。

图 3 所示为高频突发脉冲控制的动作原理。本控制的原理，是监视谐振电压和谐振电流，通过三个脉冲来控制关断时机。第 1 脉冲（LO）使第 2 脉冲（HO）处于可谐振的状态，并且在谐振电压阈值电压 V_{Pth1} 下关断。第 2 脉冲（HO）传输电力，在谐振电压阈值电压 V_{Pth2} 下关断。第 3 脉冲（LO）在谐振电流阈值电压 I_{Crth3} 下关断。

图 4 所示为用来检测谐振电压、谐振电流的外部电路。谐振电压使用辅助绕组（VW 端子）进行检测，谐振电流使用分流电路（IS 端子）进行检测。这是与强制关断功能相同的检测方法，因此无需重新追加外部电路，使用现有电路即可进行高频突发脉冲控制。

图 5 所示为高频突发脉冲控制的动作波形。仅在第 2 脉冲导通的期间内，电流才会流过次级侧二极管。

控制第 2 脉冲的导通宽度，可决定电流的峰值和传输的电量，进而决定突发脉冲频率。这样就可以根据负载量，将导通宽度和脉冲频率控制到最佳，实现无浪费传输电力，

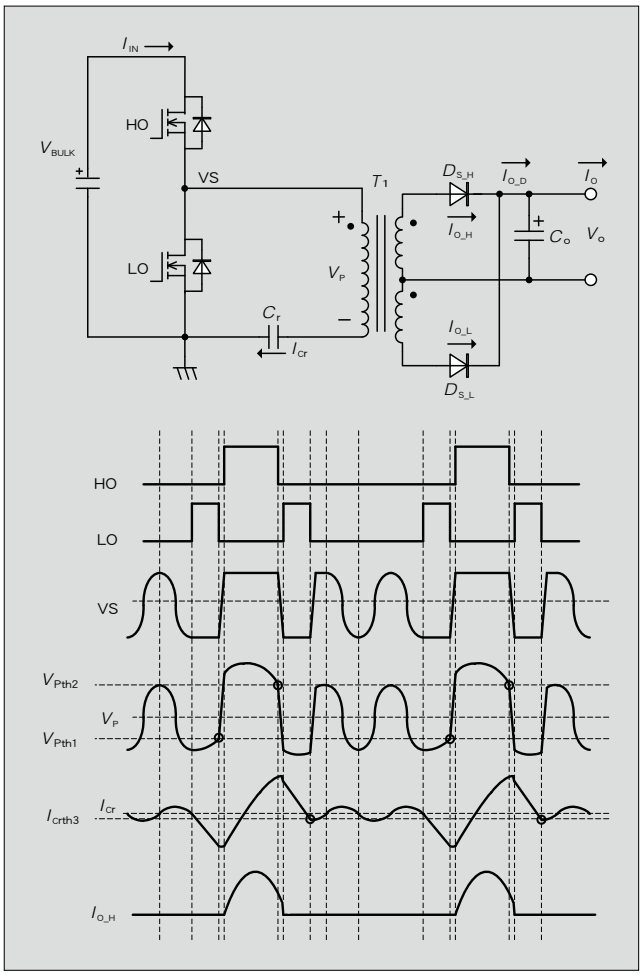

图 3　高频突发脉冲控制的动作原理

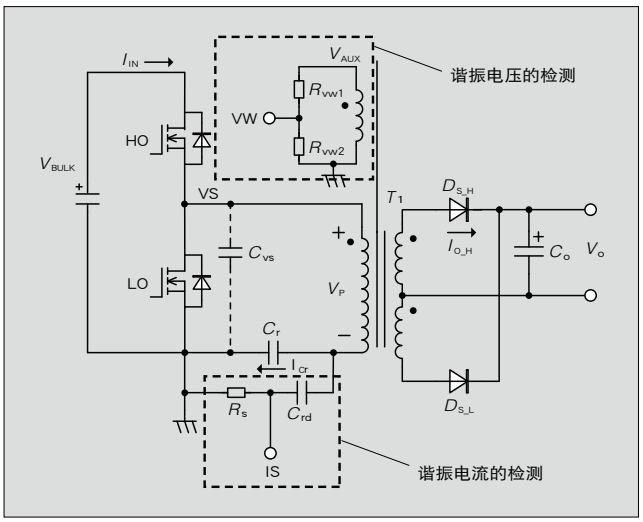

图 4　外部电路的结构

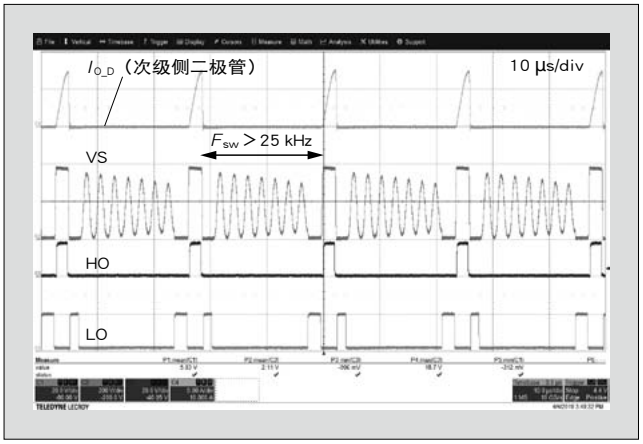

图 5　高频脉冲控制的动作波形

提高效率。此外，可将突发脉冲频率限制在 25 kHz 以上，高于听觉频率。这样，可抑制变压器的噪声，同时还能抑制输出电压纹波。

图 6 所示为采用了高频突发脉冲控制的 IC 动作与电源效率。以往，为降低变压器的噪声而进行连续开关控制的 10 ～ 22 W 的范围，通过采用在 25 kHz 以上进行开关的高频突发脉冲控制，降低噪声的同时还提高了电源效率。

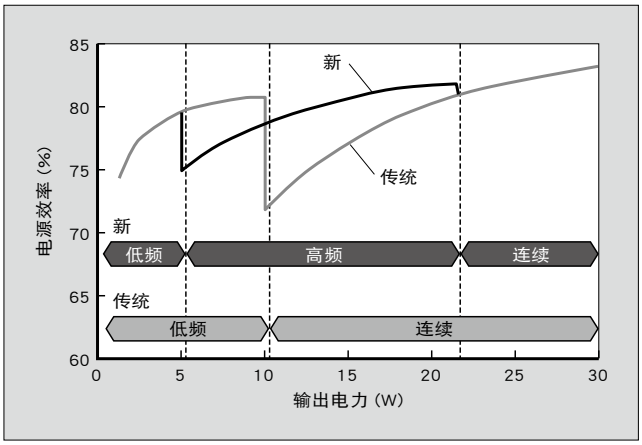

图 6　电源效率与 IC 的控制方法

3. 2 谐振电流相位比控制

富士电机传统的 LLC 电流谐振控制 IC，向 FB 端子输入电源的次级输出电压，根据该输入电压调制正常运行时的振荡频率，从而对输出电压进行反馈控制。

FA6C00 系列新采用了谐振电流相位比控制。除原来次级输出电压的反馈（FB）之外，该控制还将初级的谐振电流 I_{Cr} 也用于控制，从而减小了相位延迟，实现高速响应，而且削减了相位补偿电路的部件。

图 7 所示为谐振波形，**图 8** 所示为谐振相位比 K_{CPR} 与输出电力 P_o 的关系。如果将谐振电流 I_{Cr} 极性反转前后的时间比定义为谐振电流相位比，则谐振电流极性反转的谐振相位比 K_{CPR} 由式(1)给出。

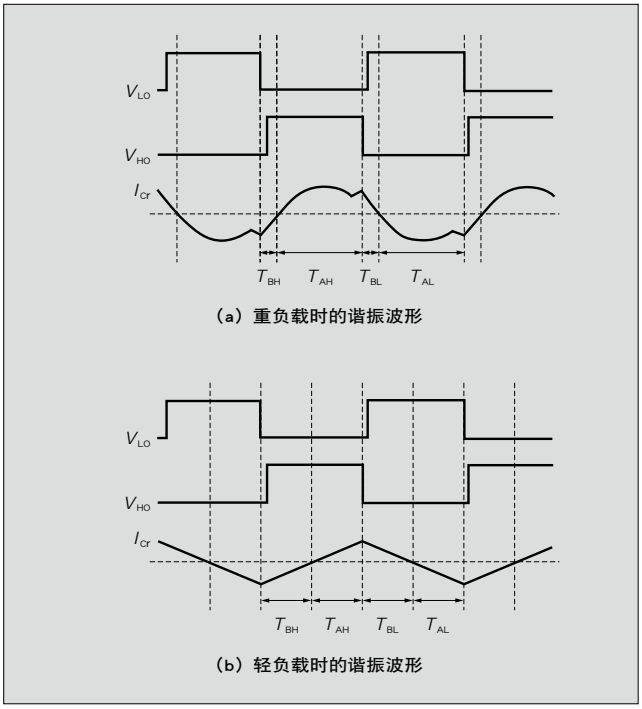

图 7 谐振波形

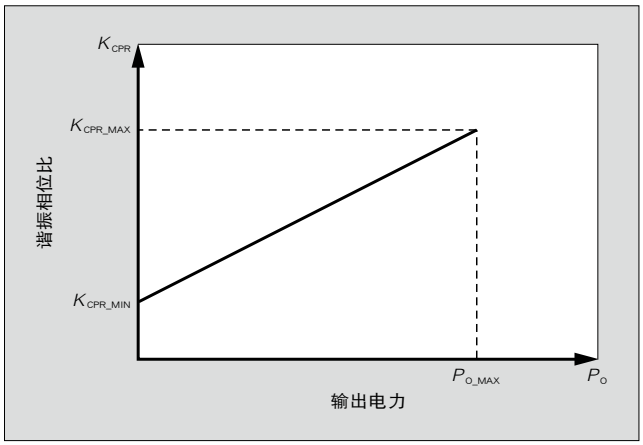

图 8 谐振相位比 K_{CPR} － 输出电力 P_o

$$K_{CPR}=\frac{T_{AH}}{T_{BH}}=\frac{T_{AL}}{T_{BL}} \quad \cdots\cdots(1)$$

K_{CPR}：谐振相位比

T_{B*} ：桥的单侧 MOSFET 关断后，谐振电流达到零所需的时间

T_{A*} ：直到桥的对向 MOSFET 关断所需的时间

※T_{A*}，T_{B*} 的“*”部分

“H”：高侧

“L”：低侧

谐振相位比 K_{CPR} 与输出电力 P_o 之间存在线性关系。根据这一关系，通过控制谐振相位比 K_{CPR}，可不受输入电压、输出电压限制地控制输出电力 P_o。谐振电流相位比控制通过根据反馈电压 V_{FB} 计算谐振相位比来控制导通宽度。V_{FB} 与谐振相位比 K_{CPR} 的关系可按照式(2)决定。根据式(1)和式(2)，谐振电流 I_{Cr} 极性反转后的时间 T_{A*} 可如式(3)、式(4)那样求出。如果测定谐振电流 I_{Cr} 的极性反转前的时间 T_{B*}，则可计算出与此时的 V_{FB} 相应的极性反转后的时间 T_{A*}，由此可决定关断点。

$$V_{FB}=\frac{K_{CPR}}{A}+B \quad \cdots\cdots(2)$$

V_{FB} ：反馈电压

K_{CPR} ：谐振相位比

A，B：常数

$$T_{AH}=(V_{FB}-B)\cdot A\cdot T_{BH} \quad \cdots\cdots(3)$$

$$T_{AL}=(V_{FB}-B)\cdot A\cdot T_{BL} \quad \cdots\cdots(4)$$

4 对电源电路的使用效果

4. 1 削减电路部件数量与高速响应

图 9 所示为搭载 FA6C00 系列的应用电路图。通过与富士电机生产的临界模式 PFC 控制 IC“FA1B00 系列”的联动动作，可进一步提高效率。

表 2 及**图 10** 所示为电源部件的削减效果。通过采用谐振电流相位比控制，可减少 7 个相位补偿电路部件，有效降低电源的系统成本。而且，通过变更 PFC-LLC 之间的联动信号，比以往产品削减了 1 个联动电路的部件。

图 11 所示为负载骤变响应特性。通过上述谐振电流相位比控制，可提高电源的响应性，将负载骤变时的输出电压纹波 ΔV_o 控制在 5% 以内。

4. 2 提高轻负载效率

图 12 所示为实际电源效率。通过新采用的高频突发脉冲动作控制，轻负载（11 W 负载）时的效率提高了约 10%。仅通过原来的连续开关控制和低频突发脉冲控制，在动作模式切换的负载下效率降低，但通过在连续开关控制和低频突发脉冲控制之间设置高频突发脉冲控制，可在约 10 ～ 22 W 的轻负载范围提高效率。另外，在约 6 ～ 10 W 的范

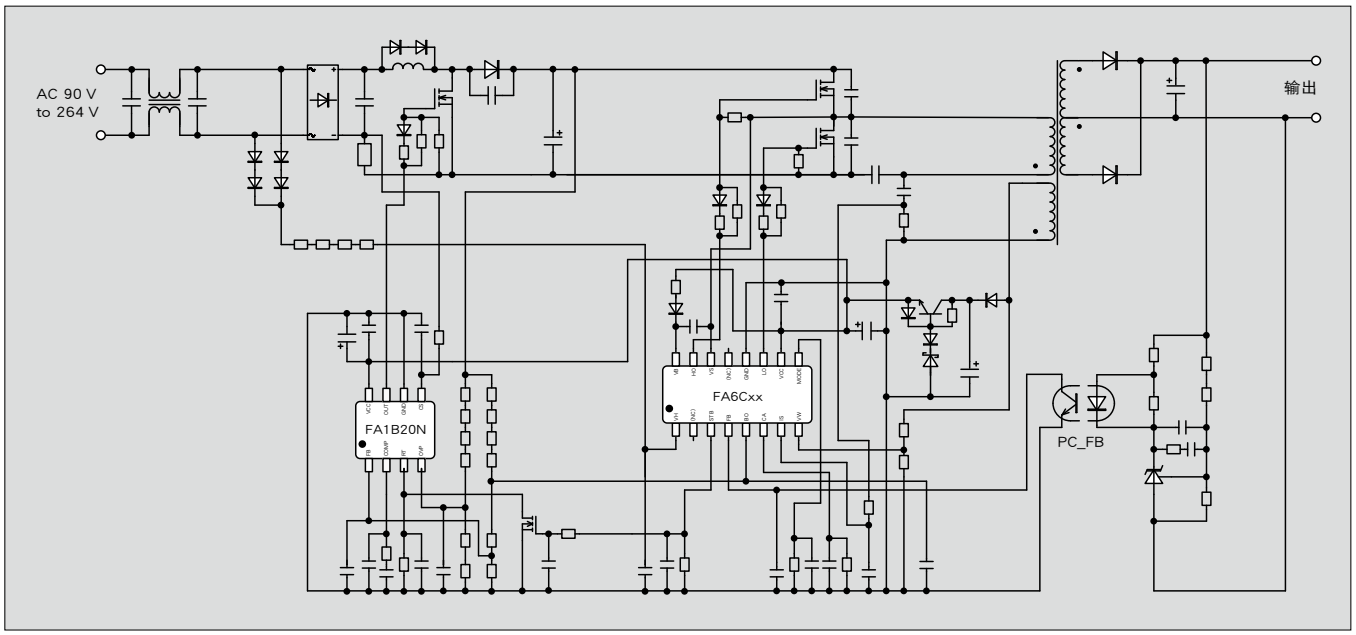

图 9　应用电路示例

表 2　电源部件削减效果

功能	部件	部件个数		削减数
		新	传统	
相位补偿电路	晶体管	0	1	-1
	电容器	1	3	-2
	电阻	0	4	-4
	合计	1	8	-7
PFC-LLC 联动电路	晶体管	1	1	0
	电容器	3	3	0
	电阻	3	4	-1
	合计	7	8	-1

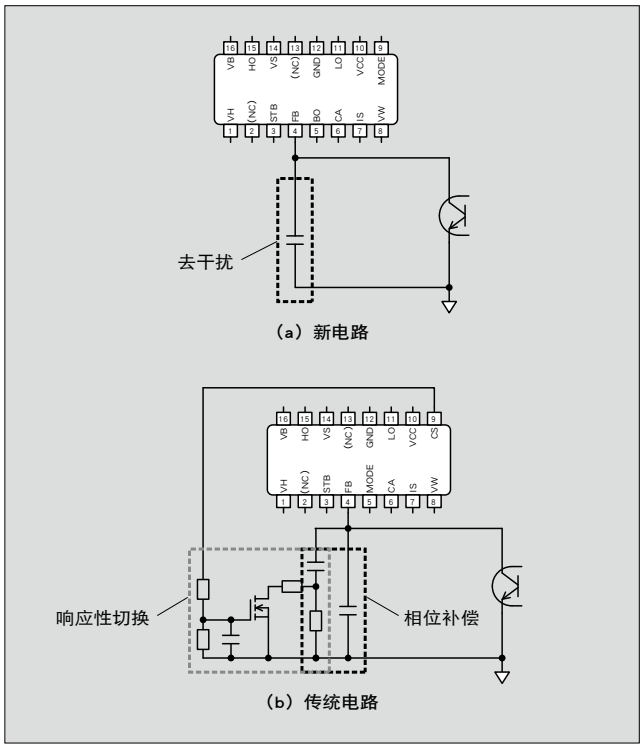

图 10　相位补偿电路

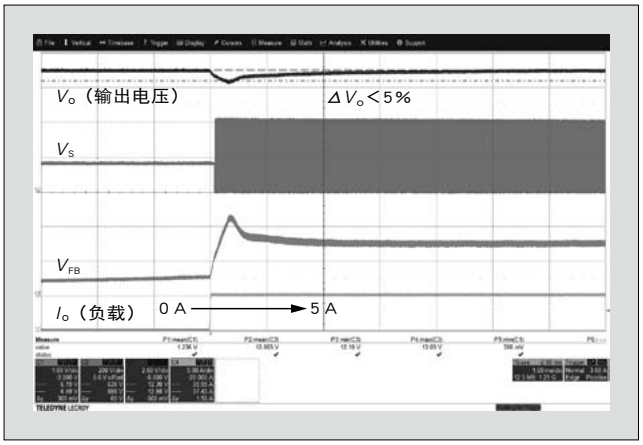

图 11　负载骤变响应特性

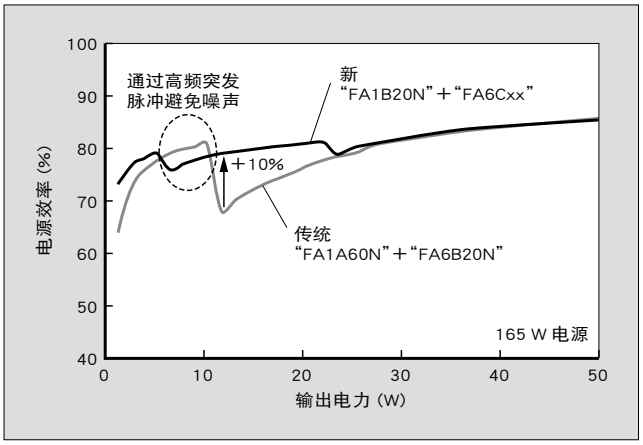

图 12　电源效率

围，通过高频突发脉冲控制进行动作，效率虽稍有降低，但更好地降低了变压器的噪声。结果表明，高频突发脉冲控制技术在提高轻负载效率和减轻变压器噪声方面是有效的。

5 后记

本文对第 4 代 LLC 电流谐振控制 IC “FA6C00 系列”进行了论述。通过搭载该 IC 构成电源，可提高轻负载效率，削减电源部件的数量。

富士电机将持续推进产品开发工作，以在今后确立可进一步实现高效率和部件削减的新技术，从而满足日益严格的产品标准和市场要求。

参考文献

⑴ 山田谷政幸ほか. LLC 電流共振制御 IC「FA5760N」. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.445-451.
⑵ 陈建等. 第 2 代 LLC 电流谐振控制 IC “FA6A00N 系列”. 富士电机技报. 2014, vol.C6, no.1, p.18-22.
⑶ 川村一裕等. LLC 电流谐振电源的电路技术. 富士电机技报. 2015, vol.C7, no.1, p.29-33.
⑷ 园部孝二等. 高效电源用临界模式 PFC 控制 IC “FA1A60N”和 LLC 电流谐振控制 IC “FA6B20N”. 富士电机技术期刊. 2017, vol.C9, no.1, p.49-54.
⑸ 远藤勇太等. 第 4 代临界模式 PFC 控制 IC “FA1B00 系列”. 富士电机技术期刊. 2018, vol.C11, no.1, p.37-41.

小林　善则
从事开关电源控制 IC 的开发。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部产业事业部产业分立器件部。

田中　公德
从事开关电源控制 IC 的开发。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部产业事业部产业分立器件部。

森本　敏光
从事功率半导体的现场应用工程师的工作。现就职于富士电机株式会社电子元件事业本部营业统括部应用技术部。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。