配列された多数のLEDを効率よく駆動する三段電源回路

ジェームス・アルベルチ

PFC段、反転型定電流降圧レギュレータおよび下流のDC/DC変圧回路の組合わせによって、90%以上の効率でのLEDの駆動が可能になる。

街灯や競技場の照明塔など、ハイパワーLED照明の用途では、設計が容易で、柔軟性や安全性など多数の利点をもつ多重配列アーキテクチャの構成が好まれる。その工学技術としての課題としては、高効率、長寿命、均一光出力などが挙げられる。高効率と長寿命はコストのかかる保守費用の低減を可能にするため、LED照明システムの全体価値の向上において重要な役割を果たす。

多重配列アーキテクチャの最も一般的な方法は、LED配列のそれぞれのレギュレータ（調整回路）に出力電圧を加え、個別に一定のDC出力電圧が得られる力率補正（PFC）フロントエンド付きの市販の電源回路を使用するものである。このアーキテクチャの効率を最大にするには、降圧レギュレータと、クラスIIまたは60VDCのSELV最大電圧の範囲内で最高のDC出力が得られる電源回路の使用が望ましい。この方法の場合、著者は通信用途に広く使われている市販の36Vまたは48VDC出力の電源回路の使用を推奨する。

多重降圧レギュレータアプローチ

多重降圧レギュレータによるアプローチは、簡単で素早く商品化できることなどいくつかの利点がある。しかし、この方法はコストが非常に高くなり、とくにLED配列の数が増えると、多数の降圧レギュレータが必要になる。簡単な降圧レギュレータは、パルス幅変調（PWM）コントローラ、インダクタ、MOSFET、ダイオードおよび少数のレジスタとキャパシタから構成される。より高い効率が必要になる場合は、自由度の大きいダイオードをMOSFETに置き換え、同期降圧動作の可能なPWMコントローラを使用すればよい。

これに代わるアプローチは米テキサス・インスツルメンツ社（TI）のSimpLEDrive技術に基づく多重変圧回路を使用する（図2）。この方法はPFCセクション、反転型定電流降圧レギュレータおよび下流のDC/DC変圧回路からなる三段アプローチを使用する。このアプローチは90%以上の効率が実現され、その最新のストリング電流調整回路からは最高の品質と最も均一な光出力を得ることができる。また、受動シリコン制御整流回路（SCR）で構成される個別の配列クローバ回路を付加すると、冗長性の確保と信頼性の向上が可能になる。故障が発生してLEDの一つが開放状態になると、故障した配列はクローバ回路によって効果的に短絡されるが、残りの配列は良好な電流調整状態を維持する。その結果、全体のシステムコストが低減し、モジュール構成が簡素化されるばかりでなく、多重変圧回路がLED照明の模範的な電源回路として機能する。

多重変圧回路法を用いると、これが電気絶縁された設計であり、2次側の出力電圧がULクラスIIやSELVレベル、もしくは60VDCや42VACに収まる設計が可能になることがわかる。この範

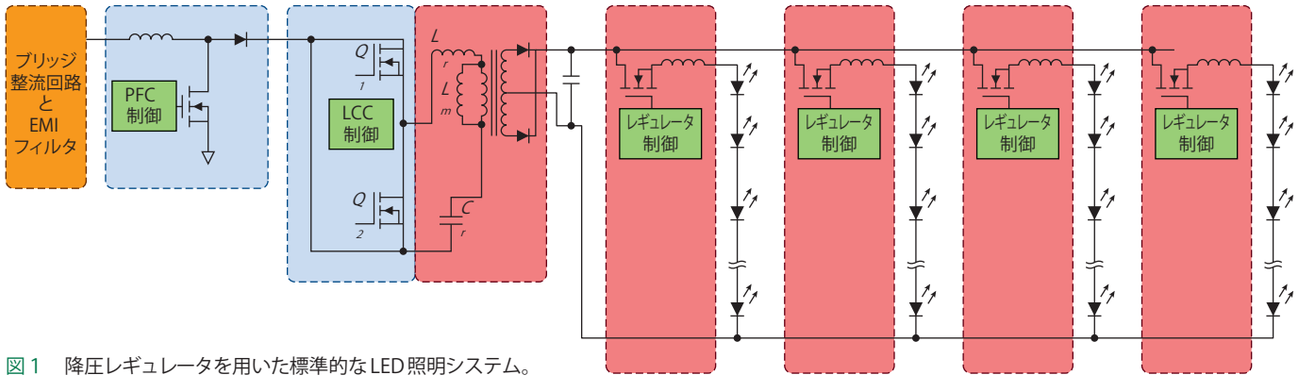

図1　降圧レギュレータを用いた標準的なLED照明システム。

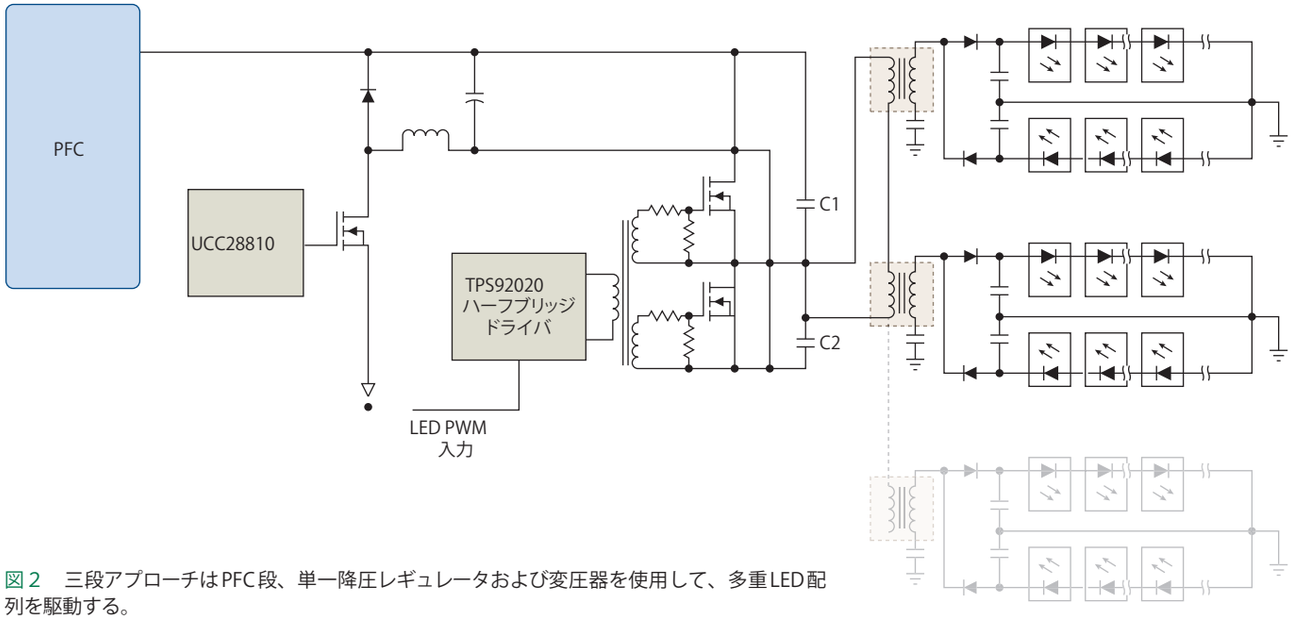

図2　三段アプローチはPFC段、単一降圧レギュレータおよび変圧器を使用して、多重LED配列を駆動する。

囲内の出力電圧を用いると、照明器具の設計は非常に簡素化され、面倒な安全監督局の承認手続きが不要になる。この方式は基本的に設計の柔軟性が付加されるため、同じ電源回路に基づいて異なる用途の照明器具の設計を行うことも可能になる。

多重変圧回路法の動作時の配列電流整合度は1%を超える。したがって、この方式は高効率の共振動作をもたらし、そのコスト効果は配列数が増えるほど高くなる。

三段アプローチの内部

PFC回路の出力は入力線間電圧のピークよりも10～20%ほど高いDC電圧に昇圧されている。このPFC電圧は次段に送られ、そこでは反転型降圧レギュレータを用いた定電流出力への調整が行われる。反転型降圧レギュレータは1次側の定電流制御ループが閉じられている。この降圧の電流出力は下流のハーフブリッジコントローラ、二つのMOSFET、C1とC2のキャパシタおよび

変圧器で構成されるDC/DC変圧回路へ送られる。

次に、降圧からの電流はハーフブリッジされたMOSFETにより整流され、直列変圧器の1次側へスイッチされる。キャパシタのC1とC2には、ハーフブリッジのための電圧ドライバ、共振回路の要素部品、変圧器の飽和を防ぐDC遮断キャパシタなどの多数の機能がある。

MOSFETは共振動作によるゼロ電圧スイッチング（ZVS）動作が可能になる。その結果、スイッチング損失が大幅に減少し、高い周波数の動作も選択可能になる。このことは受動部品のサイズの縮小と電源回路の効率の最大化に役立つ。

DC/DC段はすべての直列変圧器の1次側を通して、電流のDCからACへの変換と交流の整流を行う。このアプローチは柔軟性が強化されるため、より多くの変圧器を直列に配置し、LED配列を増やすことが可能になる。変圧器の巻数比の計算には、LED配列の総数と順電圧の良好な近似が必要になる。ここでは各配列が同数のLEDで構成されることが前提となる。

最大効率の設計

電源回路の設計では、効率最大化のためには消費電力の最小化が望ましい。そのために、入力電圧に対する出力電圧の比を最小にし、出力電圧をできるだけ入力電圧に近づけることが必要になる。高出力の照明用途の多くはPFCを使用する。そこで、プロセスを一つの機能ブロックと見なして簡素化し、その出力に代表的な値を割当て、出力は要因の数に応じて変化すると考えることにする。

能動PFC回路の多くは昇圧されて動作するため、PFCの出力電圧は最も高いAC線間電圧のピークよりも高く設定する必要がある。一般の電源回路の入力電圧は85～265VACの範囲にあり、約375Vのピーク電圧が発生する。許容範囲とリップルのためのヘッドルームが付加されるため、標準の設定値は400Vになる。

PFC段からの400Vの電圧は下流の反転型降圧レギュレータの入力になる。PFCの出力が、能動PFC電源回路の設計において標準的なAC線間電圧と異なるのであれば反転降圧が調整を継続する必要があることを考慮し、PFC回路の最小出力電圧を決定する必要がある。すべてがLEDの負荷とバルクの蓄積容量に起因する約40Vの標準的なリップルの発生を仮定し、この40Vを400Vの設定電圧から差引くと、反転降圧のための最小入力電圧は360Vになる。

反転降圧はコンプライアンス電圧出力に準拠した設計も求められる。この場合は80Vが許容されるため、出力電圧は280Vになる。

10個のLEDの配列の例

次に、上述の動作条件と設計例に基づいて、反転降圧の定電流セットポイントの計算法と変圧器の巻数比の決定法を説明する。

この例では二つの変圧器を使用して四つのLED配列を1Aの電流で駆動する。それぞれの配列は10個の高出力LEDから構成される。1個のLEDは3.5Vの順電圧（V_f）を仮定し、配列の全電圧が35Vになるようにする。

反転型降圧レギュレータからの280Vの出力はDC/DC変圧回路に入力される。直列変圧回路の1次側の印加電圧は、C1とC2からなるキャパシタ分圧器によって280Vの半分になる。その結果、直列変圧回路の1次側の全体には140Vの電圧が印加される。それぞれの変圧器の1次電圧（V_p）は、ブリッジ電圧（140V）を変圧器の数②で割算したVp=70Vになる。

変圧器の巻数比は次式①を使用して簡単に計算できる。

$$\frac{N_p}{N_s}=\frac{V_p}{V_s}=\frac{70V}{35V}=2=2:1\text{の巻数比} \quad ①$$

ここで、N_pは1次側の巻数、N_sは2次側の巻数、V_sは2次側またはLED配列の印加電圧、V_pは1次側の各巻線への印加電圧を示している。

セットポイントの計算

反転降圧電流出力のセットポイントは、結合したLED配列の全体出力パワーと、電流制御ループが閉じられる反転降圧段の電圧を調べれば簡単に計算できる。10個のLED配列から成る四つの配列を1Aの電流で駆動したときの全体出力パワーは140Wになる。反転型降圧レギュレータの出力電圧が280Vに設定されると、電流出力は約500mAになる。下流では降圧レギュレータからのいくらかの損失が生じるため、反転型降圧レギュレータには若干の調整が必要になる。

降圧レギュレータの電流セットポイントは次式②により計算できる。

$$I_{set}=\frac{P_{LEDS}}{V_{BUCK}}=\frac{140W}{280V}=0.5A \quad ②$$

この演習は多重変圧回路がかなり簡単に設計できることを示している。簡単な調整を行えば、LEDのさまざまな電流や配列の要請に対応できる。このモジュラ方式はわずかな設計の修正で多数の照明用途にも適用できる。

著者紹介
ジェームス・アルベルチ（James Alberti）はテキサス・インスツルメンツ社（Texas Instruments）の電源制御装置の製品マーケティングエンジニアとして、LED製品の技術マーケティングを担当している。
email：ti_jimaliberti@list.ti.com.

LEDJ