

Buck(Step-down)Dönüştürücüler

İhsan T. Sezgin

www.voltqtech.com

Giriş

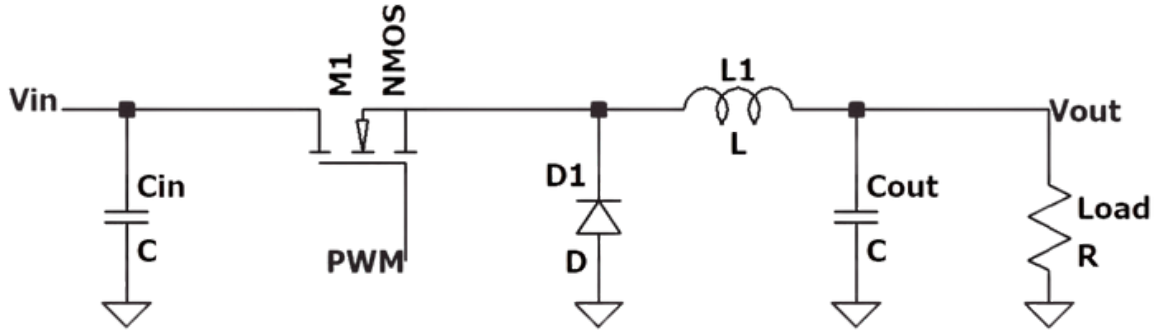
Güç elektroniğinde gerilim dönüştürme problemleri temelde lineer (linear) dönüştürücüler ve anahtarlama (switch-mode) dönüştürücüler olmak üzere iki ana yaklaşım altında ele alınır. Lineer dönüştürücüler, giriş–çıkış arasındaki farkı ısı olarak harcayan, yapısal olarak basit, düşük gürültülü ve hızlı tepki veren çözümler sunarken; verimlilikleri giriş–çıkış gerilim farkına doğrudan bağlıdır. Buna karşılık anahtarlama dönüştürücüler, enerjiyi yüksek frekansta anahtarlama olarak endüktör ve/veya kapasitörler üzerinden transfer eder, bu sayede çok daha yüksek verim, geniş giriş gerilim aralığı ve yüksek çıkış gücü elde edilmesini mümkün kılar. Ancak bu kazanımlar, artan devre karmaşıklığı, elektromanyetik girişim (EMI) ve tasarım hassasiyeti gibi mühendislik zorluklarını da beraberinde getirir. Modern elektronik sistemlerde bu iki yaklaşım çoğu zaman rakip değil, birbirini tamamlayan yapılar olarak kullanılır; uygulamanın güç seviyesi, verim hedefi, gürültü toleransı ve maliyet kısıtları hangi mimarinin tercih edileceğini belirler.

Bu iki temel yaklaşımın pratikteki en yaygın temsilcilerinden biri anahtarlama dönüştürücüler tarafında yer alan Buck (step-down) dönüştürme topolojisidir. Buck dönüştürücü, girişteki daha yüksek bir DC gerilimi, yüksek verimle daha düşük bir DC gerilime dönüştürmek amacıyla tasarlanmış anahtarlama bir güç dönüştürücüsüdür. Çalışma prensibi; bir anahtarlama elemanı, asenkron tasarımlar için diyot ,senkron tasarımlar için anahtar, bir indüktör ve çıkış kapasitesi üzerinden enerjinin kontrollü olarak depolanması ve aktarılmasına dayanır. Lineer regülatörlerin aksine, fazla gerilimi ısıya dönüştürmek yerine anahtarlama oranı (duty cycle) ile çıkış gerilimini belirlediği için özellikle yüksek giriş–çıkış farklarında ve orta-yüksek akım seviyelerinde belirgin verim avantajı sağlar. Bu nedenle Buck converter’lar, modern gömülü sistemlerden endüstriyel kontrol kartlarına kadar geniş bir uygulama alanında, çoğu zaman bir lineer regülatörle birlikte kullanılarak hem verim hem de düşük gürültü gereksinimlerini aynı anda karşılayan hibrit güç mimarilerinin temel yapı taşıdır.

Notasyon ve Tanımlar

V_{in}	: Giriş gerilimi
V_{out}	: Çıkış gerilimi
I_{out}	: Çıkış akımı
P_{in}	: Giriş gücü
P_{out}	: Çıkış gücü
η	: Verimlilik
D	: Duty cycle
$f_{(sw)}$	: Anahtarlama frekansı
T	: Anahtarlama periyodu
$T_{(on)}$	: Anahtarın iletim süresi
$T_{(off)}$	: Anahtarın kesim süresi
L	: İndüktans
IL	: indüktör akımı
ΔIL	: indüktör akım dalgalanması (ripple)
I_{sat}	: İndüktör doyum akımı
R	: indüktör DC direnci
C_{in}	: Giriş kapasitesi
C_{out}	: Çıkış kapasitesi
ESR	: Eşdeğer seri direnç
ΔV_{out}	: Çıkış gerilim dalgalanması (ripple)
$R_{ds(on)}$	: MOSFET iletim direnci
Q_g	: MOSFET toplam gate yükü
P_{cond}	: İletim kaybı
P_{sw}	: Anahtarlama kaybı
V_f	: Diyot ileri yön gerilim düşümü
P_{diode}	: Diyot iletim kaybı
P_{sr}	: Senkron MOSFET iletim kaybı
CCM	: Continuous Conduction Mode
DCM	: Discontinuous Conduction Mode
BCM	: Boundary (Critical) Conduction Mode

Buck(step-down)topolojisi

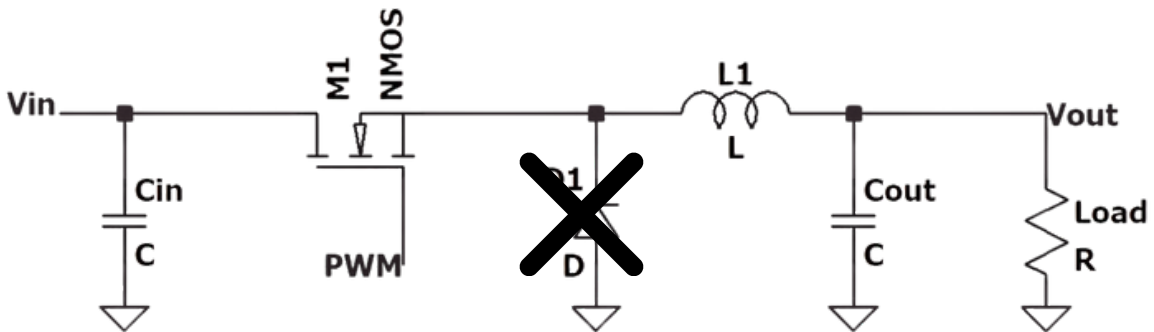


Şekil 1. Temel Buck(Step-down) Devresi

Buck converter (step-down DC-DC dönüştürücü), girişteki doğru gerilimi daha düşük ve regüle edilmiş bir seviyeye indirmek için anahtarlama esaslı enerji aktarımını kullanan temel bir güç elektroniği topolojisidir. Lineer regülatörlerin aksine, giriş-çıkış arasındaki gerilim farkını ısı olarak harcamak yerine enerjiyi zamana bağlı olarak anahtarlara depolar ve kontrollü biçimde yüke iletir. Bu sayede özellikle yüksek gerilim farklarında ve anlamlı güç seviyelerinde belirgin verim avantajı sağlar.

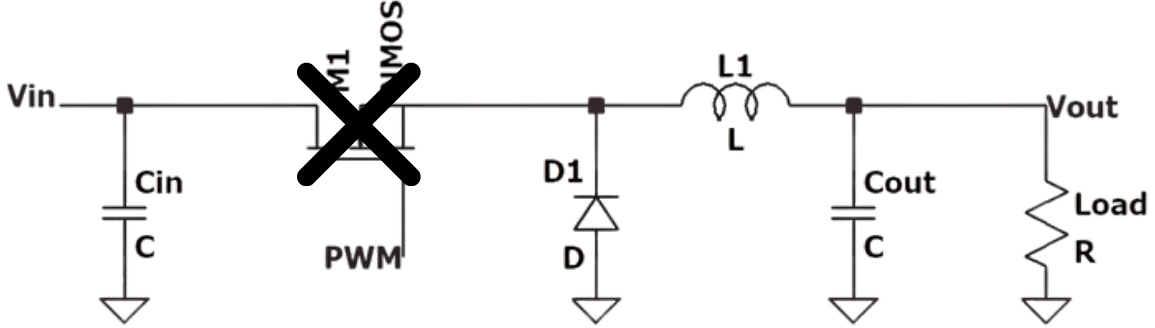
Buck converter'ın çalışma prensibi, enerjinin anahtarlama yoluyla zamana bölünmüş olarak depolanması ve kontrollü şekilde yüke aktarılması esasına dayanır. Devre, doğrusal bir gerilim düşürme yaklaşımı yerine, anahtarlama elemanını yüksek frekansta açıp kapatarak giriş kaynağını periyodik olarak devreye bağlar ve ayırır. Bu süreçte endüktör ve kapasitör, enerjiyi filtreleyip süreklilik sağlayarak darbeleri düzleştirir ve bir DC çıkışa dönüştürür.

Bir anahtarlama periyodu iki temel fazdan oluşur. İlk fazda, yani anahtar iletimdeyken (ON durumu), giriş gerilimi doğrudan indüktör ve yük üzerine uygulanır. İndüktör üzerindeki pozitif gerilim nedeniyle indüktör akımı zamanla artar ve manyetik alan içinde enerji depolanır. Aynı anda hem yük beslenir hem de çıkış kapasitesi şarj edilir. Bu fazda enerji, kaynaktan hem anlık olarak yüke aktarılır hem de bir kısmı geçici olarak indüktörde depolanır.



Şekil 2. Anahtar İletim Durumunda

İkinci fazda, yani anahtar kesimdeyken (OFF durumu), giriş kaynağı devreden ayrılır. Ancak indüktör akımı ani olarak sıfıra düşmez; akımın sürekliliği prensibi gereği akışını sürdürmek ister. Bu nedenle akım, serbest dolaşım yolu üzerinden yük ve kapasite tarafına akmaya devam eder. Bu sırada indüktörde depolanan enerji boşalır ve yük beslenmeye devam eder. indüktör akımı bu fazda azalır fakat kesintiye uğramaz. Böylece yük, anahtar kapalı olsa bile enerjisiz kalmaz.



Şekil 3. Anahtar Kesim Durumunda

Bu iki faz art arda ve yüksek frekansta tekrarlandığında, yük tarafında darbeli bir enerji yerine ortalaması alınmış kararlı bir gerilim oluşur. Çıkış kapasitesi, anahtarlama kaynaklı dalgalanmaları sönümleyerek gerilimi düzgünleştirir; indüktör ise akımı yumuşatarak ani değişimleri engeller. Dolayısıyla indüktör akımı nispeten yavaş değişirken, anahtar üzerinde hızlı anahtarlama gerçekleşir.

Çıkış geriliminin seviyesi, anahtarın iletimde kaldığı sürenin toplam periyoda oranı ile belirlenir. Anahtar daha uzun süre iletimde kalırsa yüke aktarılan ortalama enerji artar ve çıkış gerilimi yükselir; daha kısa süre iletimde kalırsa çıkış gerilimi düşer. Bu oran geri besleme kontrolü ile ayarlanarak regülasyon sağlanır. Böylece giriş gerilimindeki değişimler veya yükteki akım artışları sistem tarafından otomatik olarak kompanse edilir.

Özetle Buck converter, enerjiyi sürekli ve doğrusal bir şekilde değil, paketler hâlinde anahtarlarken, pasif elemanlar yardımıyla bu enerjiyi ortalayan bir yapı sunar. Bu prensip, lineer regülatörlerde görülen yüksek güç kayıplarını ortadan kaldırarak daha verimli, termal açıdan daha avantajlı ve yüksek akım uygulamalarına uygun bir gerilim düşürme çözümü sağlar.

Tasarım Parametreleri ve Hesapları

Giriş Gerilimi

Buck tasarımı tek bir gerilime değil, bir aralığa göre yapılır. Kaynağın adaptör, batarya, endüstriyel besleme gibi karakteri burada belirleyicidir. Bundan dolayı giriş geriliminin minimum değeri ($V_{in(min)}$) ve giriş geriliminin maksimum değeri ($V_{in(max)}$) değerleri en başta belirlenmelidir.

Çıkış Gerilimi

Tasarım doğrultusunda hedeflenen çıkış gerilimi (V_{out}) belirlenmelidir. Regülasyon hassasiyeti, tolerans ve geri besleme mimarisi bu değer etrafında şekillenir.

Çıkış Akımı

Tasarım doğrultusunda hedeflenen çıkış akımının maksimum değeri ($I_{out(max)}$) belirlenmelidir. Komponent seçim mimarisi bu değer etrafında şekillenir.

Duty Cycle

Buck dönüştürücü tasarımında duty cycle (görev oranı) en temel ve en belirleyici parametredir. Çünkü aslında buck dönüştürücünün yaptığı iş, çıkış gerilimini analog olarak “azaltmak” değil, anahtarlama süresini ayarlayarak giriş enerjisinin ortalamasını kontrol etmektir. Duty cycle tam olarak bu zaman oranını tanımlar. 'D' ile gösterilir.

$$\frac{V_{out}}{V_{in(max)}} = D$$

örnek olarak;

- $D = 0 \rightarrow$ hiç iletim yok
- $D = 0.5 \rightarrow$ zamanın %50'si iletim
- $D = 1 \rightarrow$ sürekli iletim

Duty cycle değeri , çıkış geriliminin giriş geriliminin maksimum değerine oranlanması ile elde edilmektedir. fakat bu formül ideal tasarımlar için kullanılabilir. Gerçek tasarımlar için kayıpları da hesaba katmak için verimlilik(η) parametreside eşitliğe dahil edilmelidir. Verimlilik ilerleyen bölümlerde detaylı açıklanacaktır.

$$\frac{V_{out}}{V_{in(max)} \times \eta} = D$$

Duty cyle değerini zamanlama parametrelerindende elde edebiliriz.

$$\frac{1}{f(sw)} = T(s) \quad \frac{T(on)}{T(s)} = D$$

Burada T(on), anahtarın iletimde kaldığı süreyi; T(s) anahtarlama periyodunu ve f(sw) anahtarlama frekansını ifade eder. Anahtarlama frekansına ilerleyen bölümlerde detaylı açıklanacaktır.

Gerçek buck dönüştürücülerde duty cycle, ideal analizdeki 0–1 aralığı yerine, kontrolör mimarisi ve donanımsal sınırlamalar nedeniyle belirli bir pencere içinde çalışır. Tipik uygulamalarda minimum duty cycle %1–5 aralığında, maksimum duty cycle ise %90–95 aralığındadır. Tasarım sırasında giriş gerilimi ve anahtarlama frekansı bu duty cycle sınırları dikkate alınarak seçilmelidir.

Anahtarlama Frekansı

Anahtarlama frekansı f(sw), buck dönüştürücünün her bir anahtarlama çevrimini ne kadar sürede gerçekleştirdiğini belirleyen temel tasarım parametresidir.

$$\frac{1}{f(sw)} = T(s)$$

Anahtarlama frekansı, kullanılacak bobin değerini , çıkış gerilimindeki dalgalanma(ripple), anahtarlama kayıpları ve elektromanyetik yayılım (EMI) davranışını doğrudan etkiler.

Buck dönüştürücüler için tipik anahtarlama frekansları:

Yüksek verim / yüksek güç	100 kHz – 300 kHz
Genel amaç	300 kHz – 1 MHz
Kompakt tasarım	1 MHz – 2.5 MHz

İndüktör Akım Dalgalanması

Buck dönüştürücüde indüktör, enerjiyi depolayan ve çıkış akımını süreklileştiren temel elemandır. Anahtarlama sırasında indüktör akımı sabit değildir; her çevrimde artıp azalır ve üçgen dalga formunda bir akım dalgalanması (ripple) oluşur. Bu dalgalanmanın büyüklüğü hem çıkış gerilim kalitesini hem de bileşen streslerini doğrudan etkiler. Bu nedenle bobin seçimi yaparken indüktör akım dalgalanması (ΔIL) göz önünde bulundurulmalıdır.

$$\frac{(V_{in(max)} - V_{out}) \times D}{L \times f(sw)} = \Delta IL$$

Bu dalgalanmanın sistem üzerine ciddi etkileri vardır. Örneğin küçük ΔIL büyük bobin seçimi, düşük EMI, düşük RMS kayıp ve yüksek maliyet getirirken daha büyük bir ΔIL alandan tasarruf, çıkışta kararsızlık, artan anahtarlama ve kapasite stresi ve daha yüksek EMI gibi sonuçlar doğurmaktadır.

Bu nedenle tipik mühendislik pratiğinde uygun değeri belirlemek için aşağıda verilen eşitlik kullanılır.

$$\Delta IL \approx (0.2 \rightarrow 0.4) \times I_{out}$$

Çıkış Gerilim Dalgalanması

Buck dönüştürücülerde çıkış gerilimi ideal olarak DC olsa da, anahtarlama doğası gereği belirli bir AC ripple bileşeni içerir. Bu ripple, başlıca iki fiziksel mekanizmadan kaynaklanır:

1. Endüktör akım dalgalanmasının kapasitör üzerinde oluşturduğu gerilim değişimi
2. Çıkış kapasitörünün ESR (Equivalent Series Resistance) etkisi

Toplam çıkış ripple'ı bu iki bileşenin toplamıdır.

ESR (Equivalent Series Resistance), gerçek kapasitörlerin iç yapısından kaynaklanan ve kapasitörle seri bağlı eşdeğer direnç olarak modellenen kayıp bileşenidir. Kapasitörden geçen ripple akımı bu direnç üzerinde gerilim düşümü oluşturarak çıkış ripple'ını artırır ve ısı kaybına neden olur. Buck dönüştürücülerde endüktör akım ripple'ı doğrudan kapasitörden aktığı için düşük ESR'li kapasitör kullanımı kritik öneme sahiptir.

$$\Delta IL \times ESR = \Delta V_{out}(ESR)$$

$$\Delta V_{out}(ESR) + \frac{\Delta IL}{8 \times C_{out(min)} \times f(sw)} = \Delta V_{out}$$

Çıkış gerilim dalgalanması için tek bir sabit değer bulunmamakta olup, hedef değer beslenen yükün gürültü toleransına göre belirlenir. Genel dijital sistemlerde %1–2 seviyesinde ripple kabul edilebilirken, hassas analog veya ölçüm sistemlerinde bu değer %0.1'in altına düşürülmelidir. Tasarım sürecinde önce izin verilen maksimum ripple belirlenmeli, ardından çıkış kapasitansı ve ESR değerleri bu hedefe göre boyutlandırılmalıdır.

Verimlilik (Efficiency)

Buck dönüştürücülerde temel tasarım hedeflerinden biri yüksek verimliliğdir. Anahtarlama topolojilerin lineer regülatörlere göre en büyük avantajı, giriş–çıkış gerilim farkını ısı olarak harcamak yerine enerjiyi anahtarlama prensibi ile aktarmalarıdır. Bu sayede özellikle yüksek giriş/çıkış farklarında ve yüksek akım uygulamalarında belirgin güç tasarrufu sağlanır. Verimlilik genel olarak

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out} \times I_{out}}{V_{in} \times I_{in}}$$

şeklinde tanımlanır ve pratikte %80–98 aralığında değişir. Gerçek bir buck dönüştürücüde kayıplar ideal olmayan bileşenlerden kaynaklanır ve toplam verim, güç katındaki tüm kayıp mekanizmalarının toplamı ile belirlenir.

Başlıca kayıp bileşenleri şu şekilde özetlenebilir:

- MOSFET iletim kayıpları: $I^2 \times R_{ds(on)}$
- MOSFET anahtarlama kayıpları: geçiş süreleri ve $f(s_w)$ ile orantılı
- Diyot veya senkron MOSFET kayıpları
- Endüktör bakır (DCR) ve çekirdek kayıpları
- Kapasitör ESR kayıpları
- Sürücü ve kontrol devresi tüketimi
- Toplam kayıp yaklaşık olarak

Toplam kayıp yaklaşık olarak aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir.

$$P_{loss} = P_{mos} + P_{rectifier} + PL + PC + P_{ctrl} \quad \eta \approx \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}}$$

Tasarım açısından bakıldığında verim; düşük $R_{ds(on)}$ MOSFET kullanımı, senkron doğrultma tercih edilmesi, uygun anahtarlama frekansı seçimi, düşük ESR'li kapasitörler ve düşük DCR'li indüktör kullanımı ile artırılabilir. Bununla birlikte çok yüksek anahtarlama frekansları pasif bileşen boyutunu küçültürken anahtarlama kayıplarını artırır; dolayısıyla frekans seçimi her zaman verim–boyut dengesi gözetilerek yapılmalıdır.

Sonuç olarak buck tasarımında verimlilik, tek bir bileşenin değil tüm güç katının ortak performansıdır. Doğru topoloji, uygun bileşen seçimi ve optimize edilmiş yerleşim ile yüksek verim değerleri elde etmek mümkündür ve modern senkron buck dönüştürücülerde %90 üzeri verimler tipik hale gelmiştir.

Buck Dönüştürücülerde İletim Modları

Buck dönüştürücülerde çalışma davranışı, endüktör akımının anahtarlama periyodu boyunca sıfıra ulaşp ulaşmamasına bağlı olarak üç temel iletim modunda incelenir:

- CCM (Continuous Conduction Mode) – Sürekli iletim
- BCM (Boundary / Critical Conduction Mode) – Sınır (kritik) iletim
- DCM (Discontinuous Conduction Mode) – Kesikli iletim

Bu modlar yalnızca teorik bir sınıflandırma değildir; her biri farklı akım dalga şekilleri, farklı matematiksel modeller ve farklı tasarım sonuçları doğurur. Bu nedenle iletim modu, komponent boyutlandırmasından önce belirlenmelidir.

1. Continuous Conduction Mode (CCM).

Continuous Conduction Mode'da endüktör akımı anahtarlama periyodu boyunca sıfıra düşmez.

$$iL(t) > 0$$

Başka bir ifadeyle, enerji transferi kesintisizdir ve endüktör her zaman enerji taşımaktadır.

İndüktör akımı ,DC bileşen (ortalama yük akımı) ve küçük genlikli üçgen ripple şeklinde modellenebilir.

$$I_{out} \pm \frac{\Delta IL}{2} = iL(t)$$

CCM'in en önemli avantajı sistemin lineer ve ortalama modellenebilir olmasıdır. Bu sayede temel buck bağıntıları doğrudan geçerlidir.

Düşük akım ve gerilim ripple'ı,sabit anahtarlama frekansı,kolay kontrol ve kararlılık,öngürebilir davranış ve yüksek güç uygulamalarına uygunluk gibi nedenlerle endüstriyel tasarımlarda referans çalışma modu CCM'dir.

2. Boundary / Critical Conduction Mode (BCM).

Boundary Conduction Mode'da endüktör akımı her anahtarlama periyodunda tam olarak sıfıra ulaşır, ancak negatif değere geçmez.

$$iL_{min} = 0$$

Bu mod, CCM ile DCM arasındaki sınır çalışma noktasıdır.

Sınır koşulunu belirlemek için çeşitli eşitlikler kullanılabilir.

$$L_{crit} = \frac{(1 - D) \times R}{2 \times f(sw)} \quad \begin{array}{l} L > L_{crit} \rightarrow CCM \\ L < L_{crit} \rightarrow DCM \end{array}$$

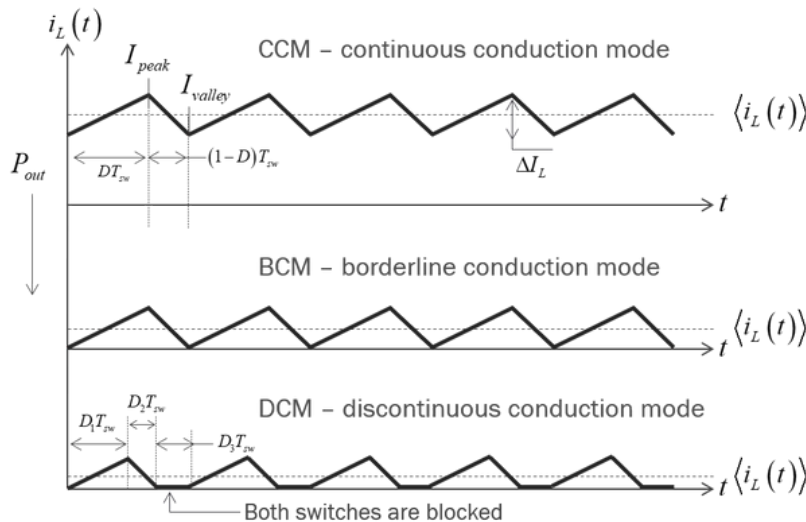
BCM'de çoğu uygulamada sıfır akım algılama (Zero current detection) ve değişken anahtarlama frekansı kullanılır. Dolayısıyla sabit frekans varsayımı bozulur ve CCM için türetilmiş kapalı form ripple denklemleri tam doğrulukla geçerli değildir. Hafif yükte verimi arttırmak, anahtarlama kayıplarını azaltmak, adaptör ve şarj cihazı gibi düşük-orta güç uygulamalarda tercih edilir.

3. Discontinuous Conduction Mode (DCM).

Discontinuous Conduction Mode'da endüktör akımı anahtarlama periyodunun bir bölümünde sıfırdır. Enerji transferi kesikli gerçekleşir.

$$iL(t) = 0 \quad \text{periyodun belli aralığında}$$

DCM'de dönüştürücü artık lineer değildir. Bu nedenle CCM'de kullanılan basit tasarım denklemleri doğrudan uygulanamaz ve analiz daha karmaşık hale gelir. Yüksek ripple, daha kötü regülasyon, zor kontrol gibi dezavantajları vardır fakat daha küçük bobin gibi avantajları vardır. Düşük güç ve kompakt uygulamalarda tercih edilir.



Şekil 4. İletim modlarının grafiksel gösterimi

Bu dokümanda sunulan tüm tasarım hesapları, ripple denklemleri ve boyutlandırma yöntemleri Continuous Conduction Mode için geçerlidir. BCM ve DCM modları özel kontrol teknikleri gerektirdiğinden ve nonlineer davranış sergilediğinden, bu modlar için genel geçer kapalı form tasarım denklemleri bulunmamaktadır. Bu nedenle pratik mühendislik tasarımlarında CCM referans alınır.

Komponent Seçimi

İndüktör Seçimi

Endüktör, akım dalgalanmasını sınırlayan ana enerji depolama elemanıdır ve CCM'de çalışmayı belirleyen en kritik komponenttir.

$$\frac{V_{out} \times (1 - D)}{\Delta IL \times f(sw)} = L$$

Yukarıdaki eşitlikten çıkan indüktör değeri teorik bir değerdir ancak gerçekte sıcaklık, indüktörlerin hata toleransı, satürasyon ile endüktans değerinin düşmesi gibi sebeplerden kaynaklı en yakın standart değer yuvarlamak gerekir

indüktör seçimi yapılırken akım değerleri'de kritiktir. Akım değerleri için aşağıdaki eşitlikler kullanılabilir.

$$I_{out} + \frac{\Delta IL}{2} = I_{peak} \qquad I_{sat} \geq 1.3 \sim 1.5 \times I_{peak}$$

Giriş Kondansatörü Seçimi

Buck dönüştürücülerde giriş kapasitörü, anahtarlama elemanının neden olduğu darbeli giriş akımını lokal olarak karşılamak amacıyla kullanılır. Buck topolojisinde girişten çekilen akım sürekli değildir; anahtar iletimdeyken kaynak akım sağlar, kesimdeyken akım neredeyse sıfıra düşer. Bu durum besleme hattı üzerinde yüksek frekanslı gerilim dalgalanmalarına ve elektromanyetik girişime neden olabilir. Giriş kapasitörü, bu darbeli akımı üzerinde taşıyarak kaynağın anahtarlama etkilerinden izole edilmesini sağlar ve giriş gerilimini kararlı tutar.

$$I_{Cin}(RMS) = I_{out} \times \sqrt{D \times (1 - D)}$$

Yetersiz akım dayanımına sahip bir kapasitör aşırı ısınır, verimi düşürür ve uzun vadede güvenilirlik problemlerine yol açar.

$$\Delta V_{in}(ESR) = I_{Cin}(RMS) \times ESR \quad C_{in} \geq \frac{I_{out} \times D \times (1 - D)}{f(sw) \times \Delta V_{in}}$$

$$C_{in}(gercek) = C_{in}(hesap) \times (1 \sim 2)$$

Girişte izin verilen gerilim dalgalanmasına göre gerekli minimum kapasite yaklaşık olarak yukarıda verilen eşitlikler ile hesaplanır. Giriş ripple'ının önemli bir bölümü kapasitörün ESR'inden kaynaklanır. Bu nedenle düşük ESR'li kapasitörler tercih edilmelidir. Elektriksel parametreler kadar PCB yerleşimi de kritiktir; giriş kapasitörü, MOSFET ve diyotla oluşturulan yüksek di/dt'li akım döngüsüne mümkün olduğunca yakın yerleştirilmelidir. Kötü yerleşim, teorik olarak doğru seçilmiş bir kapasitörün dahi beklenen performansı verememesine neden olabilir.

Çıkış Kondansatörü Seçimi

Çıkış kapasitörünün temel görevi, endüktör akımındaki üçgensel ripple bileşenini filtreleyerek yükün daha sabit bir DC gerilim görmesini sağlamaktır. CCM'de endüktör akımı sürekli ancak sabit değildir; ortalama yük akımı etrafında bir dalgalanma içerir. Bu dalgalanmanın AC bileşeni doğrudan çıkış kapasitörü üzerinden akar.

$$I_{Cout}(RMS) \approx \frac{\Delta IL}{2\sqrt{3}} \quad C_{out} \geq \frac{\Delta IL}{8 \times f(sw) \times \Delta V_{out}}$$

$$C_{out}(gercek) = C_{out}(hesap) \times (2 \sim 4)$$

Pratik tasarımlarda düşük ESR'li seramik veya polimer kapasitörler tercih edilir ve genellikle bir adet bulk kapasitör ile birkaç adet seramik kapasitör paralel kullanılarak hem düşük frekanslı enerji depolama hem de yüksek frekanslı ripple bastırma sağlanır.

MOSFET Seçimi ve Internal / External Switching Mimarileri

Buck dönüştürücülerde güç katının verimi, termal performansı ve güvenilirliği büyük ölçüde anahtarlama elemanının özelliklerine bağlıdır. Güç anahtarı pratikte bir MOSFET'tir ve dönüştürücünün en yüksek akımını ve en hızlı gerilim geçişlerini taşıyan bileşen olduğu için sistem kayıplarının önemli bir kısmı bu eleman üzerinde oluşur. Bu nedenle MOSFET seçimi yalnızca akım veya gerilim dayanımına göre değil; iletim kaybı, anahtarlama kaybı, gate sürüş gereksinimi ve termal karakteristikler birlikte değerlendirilerek yapılmalıdır.

MOSFET üzerinde iki temel kayıp mekanizması bulunur: iletim (conduction) kayıpları ve anahtarlama (switching) kayıpları. İletim kayıpları, MOSFET iletimdeyken kanal direnci üzerinden akan akımdan kaynaklanır ve yaklaşık olarak

$$P_{cond} = I(RMS)^2 \times R_{ds(on)}$$

şeklinde ifade edilir. Bu nedenle düşük $R_{ds(on)}$ değeri doğrudan verimi artırır. Özellikle yüksek akımlı ve düşük çıkış gerilimli tasarımlarda iletim kayıpları baskın hale gelir ve düşük dirençli MOSFET seçimi kritik önem taşır.

Anahtarlama kayıpları ise MOSFET'in her açılıp kapanışında hem gerilim hem akımın aynı anda sıfırdan farklı olduğu geçiş süresinde oluşur. Yaklaşık olarak

$$P_{sw} \approx \frac{1}{2} \times V_{in} \times I_{out} \times (t_r + t_f) \times f(sw)$$

şeklinde tahmin edilir. Anahtarlama frekansı arttıkça bu kayıp doğrusal olarak büyür. Dolayısıyla yüksek frekanslı tasarımlarda hızlı geçiş süreleri ve düşük gate yükü (Q_g) kritik hale gelir. Büyük çip alanına sahip çok düşük $R_{ds(on)}$ MOSFET'ler genellikle daha yüksek gate kapasitansına sahip olduğundan, iletim kaybı azalırken anahtarlama kaybı artabilir. Bu nedenle seçim her zaman bir denge problemidir.

Gerilim dayanımı seçilirken MOSFET'in drain–source gerilimi yalnızca nominal giriş gerilimine göre belirlenmemelidir. Anahtarlama sırasında oluşan overshoot ve parasitik indüktanslar dikkate alınarak güvenlik payı bırakılmalıdır. Pratikte

$$V_{ds} \geq (1.3 \sim 1.5) \times V_{in(max)}$$

Şeklinde bir eşitlik kullanılır. Akım dayanımı açısından ise MOSFET'in sürekli akım değeri beklenen RMS akımın üzerinde olmalı ve termal sınırlar kontrol edilmelidir.

Gate sürüş gereksinimi de önemli bir parametredir. Gate yükü büyüdükçe sürücünden çekilen akım artar ve geçiş süreleri uzayabilir. Gate sürücü akımı yaklaşık

$$I_{gate} = Q_g \times f(sw)$$

şeklinde tahmin edilir. Yetersiz sürüş, anahtarlama kayıplarını artırır ve MOSFET'in ısınmasına yol açar. Bu nedenle yüksek frekanslı tasarımlarda düşük Q_g 'li MOSFET'ler tercih edilir.

Buck dönüştürücülerde MOSFET'ler genellikle iki farklı mimaride kullanılır: internal switching ve external switching. Internal switching yapısında güç MOSFET'i kontrolör entegresi içerisinde gömülüdür. Bu yaklaşım daha az bileşen, daha basit PCB yerleşimi ve kompakt tasarım avantajı sağlar. Düşük ve orta güç uygulamalarında maliyet ve tasarım kolaylığı açısından oldukça uygundur. Ancak entegre MOSFET'in $R_{ds(on)}$, akım kapasitesi ve termal performansı sabittir; tasarımcı bu parametreleri optimize edemez. Yüksek akım veya yüksek verim gerektiren uygulamalarda bu sınırlamalar belirgin hale gelir.

External switching mimarisinde ise kontrolör yalnızca PWM üretir ve gate sürücüyü sağlar; güç MOSFET'i harici olarak seçilir. Bu yaklaşım tasarımcıya MOSFET parametreleri üzerinde tam kontrol sunar. Daha düşük $R_{ds(on)}$, daha yüksek akım kapasitesi, paralel MOSFET kullanımı ve daha iyi termal dağıtım mümkün hale gelir. Sonuç olarak yüksek güç ve yüksek verim gerektiren tasarımlarda external MOSFET mimarisi tercih edilir. Bunun karşılığında bileşen sayısı, PCB alanı ve tasarım karmaşıklığı artar.

Özetle, düşük güçlü ve kompakt çözümler için internal anahtarlama pratik ve yeterli bir çözüm sunarken; yüksek akım, yüksek verim veya özel termal gereksinimler söz konusu olduğunda external MOSFET kullanımı daha esnek ve optimize edilebilir bir yapı sağlar. MOSFET seçimi yapılırken iletim kaybı, anahtarlama kaybı, gate yükü, gerilim/akım marjı ve termal performans birlikte değerlendirilerek sistem hedeflerine en uygun denge noktası belirlenmelidir.

Senkron-Asenkron Mimarileri

Buck dönüştürücülerde enerji transferi yalnızca anahtarın iletimde olduğu sürede gerçekleşmez. Anahtar kapalıyken endüktör akımı sürekliliğini korumak zorundadır ve bu akım için bir serbest dolaşım (freewheeling) yolu gerekir. Bu yolun nasıl sağlandığı, buck dönüştürücünün asenkron veya senkron olarak sınıflandırılmasını belirler.

Asenkron Buck (Rectifier Diode)

Asenkron buck mimarisinde serbest dolaşım yolu bir diyot ile sağlanır. Üst anahtar (MOSFET) kapandığında endüktör akımı diyot üzerinden akar. Bu yapı topolojik olarak basit, kontrolü kolay ve maliyeti düşüktür. Bu nedenle düşük güç seviyelerinde ve basit regülatörlerde yaygın olarak kullanılır.

Ancak diyotun iletimdeyken üzerinde oluşan ileri yön gerilim düşümü (VF) nedeniyle iletim kayıpları kaçınılmazdır. CCM'de diyot, anahtarın kapalı olduğu süre boyunca iletimdedir ve bu süre yaklaşık olarak $1-D$ ile orantılıdır. Diyot üzerindeki ortalama güç kaybı yaklaşık olarak

$$P_{diode} \approx V_f \times I_{out} \times (1 - D)$$

şeklinde ifade edilir. Çıkış gerilimi düştükçe duty cycle azalır ve diyotun iletim süresi artar; bu da özellikle düşük çıkış gerilimli uygulamalarda verimin ciddi şekilde düşmesine neden olur. Bu nedenle asenkron mimari düşük akım, düşük verim, düşük maliyet ve basitliğin öncelikli olduğu durumlarda çok sık tercih edilir.

Senkron Buck (Synchronous Rectification)

Senkron buck mimarisinde diyot yerine, kontrol edilen bir alt MOSFET (synchronous rectifier) kullanılır. Üst MOSFET kapandığında, alt MOSFET kontrollü şekilde iletime alınarak endüktör akımı bu MOSFET üzerinden akar. Böylece diyotun sabit ileri gerilim düşümü ortadan kaldırılır ve iletim kaybı yalnızca MOSFET'in kanal direncine bağlı hale gelir. Alt MOSFET üzerindeki iletim kaybı yaklaşık olarak

$$P_{sr} = I(RMS)^2 \times R_{ds(on)} \times (1 - D)$$

şeklinde hesaplanır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, MOSFET üzerindeki gerilim düşümünün akımla orantılı olmasıdır; bu da özellikle yüksek akım uygulamalarında diyota kıyasla çok daha düşük kayıp anlamına gelir. Bu nedenle yüksek verim , düşük çıkış gerilimi, yüksek akım gerektiren tasarımlarda neredeyse standart haline gelmiştir.

Diyot Seçimi

Asenkron mimaride kullanılan diyot, sıradan doğrultucu diyot değildir. Anahtarlama frekanslarında çalıştığı için genellikle Schottky diyot tercih edilir. Schottky diyotlar düşük ileri gerilim düşümü ve çok kısa ters toparlanma süresi sayesinde anahtarlama kayıplarını azaltır.

Diyot seçiminde temel kriterler şunlardır:

- İleri akım dayanımı: $I_f \geq I_{out}(max)$
- Ters gerilim dayanımı: $V_R \geq V_{in}(max)$
- İleri gerilim düşümü: düşük V_f

Diyot üzerindeki ortalama güç kaybı daha önce verildiği gibi

$$P_{diode} \approx V_f \times I_{out} \times (1 - D)$$

olarak hesaplanır ve termal tasarım bu değere göre yapılmalıdır. Diyotun junction sıcaklığı, paket termal direnciyle birlikte mutlaka kontrol edilmelidir.

Senkron Rectifier (Alt MOSFET) Seçimi

Senkron mimaride alt MOSFET, diyot yerine geçerek endüktör akımını taşır. Bu MOSFET'in temel kayıp mekanizması iletim kaybıdır. CCM'de alt MOSFET'in RMS akımı yaklaşık olarak çıkış akımına eşittir ve iletim süresi $1-D$ ile orantılıdır. Alt MOSFET üzerindeki iletim kaybı:

$$P_{sr} = I(RMS)^2 \times R_{ds}(on) \times (1 - D)$$

şeklinde hesaplanır. Bu ifade, diyot kaybı ile karşılaştırıldığında senkron mimarinin neden daha verimli olduğunu açıkça gösterir; özellikle düşük çıkış gerilimlerinde $1-D$ büyük olduğundan kazanç daha da artar.

Ancak senkron mimari bazı ek zorluklar da getirir. Alt ve üst MOSFET'lerin aynı anda ilettime girmesi durumunda shoot-through oluşur ve bu durum ciddi hasara yol açabilir. Bu nedenle kontrolör, MOSFET'ler arasında dead-time ekler. Dead-time süresince kısa bir an için akım MOSFET yerine gövde diyodu üzerinden akar ve bu da ek kayıplara neden olur. Dead-time çok uzun seçilirse verim düşer, çok kısa seçilirse güvenilirlik riske girer.

Buck Regülatör Entegreleri (Buck IC'leri)

Buck dönüştürücü tasarımında kontrolör veya regülatör entegresi, sistemin çalışma karakteristiğini belirleyen en kritik bileşendir. Buck IC'leri yalnızca PWM üretmekle kalmaz; geri besleme, regülasyon, koruma mekanizmaları ve çoğu zaman gate sürüş fonksiyonlarını da bünyesinde barındırır. Bu nedenle entegre seçimi, hedeflenen verim, güç seviyesi, dinamik performans ve sistem karmaşıklığı ile doğrudan ilişkilidir.

Buck entegreleri genel olarak entegrasyon seviyelerine göre sınıflandırılır. En basit yapıda olanlar yalnızca PWM kontrolörü içerir ve güç anahtarı tamamen harici olarak seçilir. Bu tip entegreler yüksek akım, yüksek verim ve esnek tasarım gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Tasarımcı MOSFET, diyot veya senkron MOSFET seçiminde tam kontrol sahibidir. Bunun karşılığında harici bileşen sayısı ve tasarım karmaşıklığı artar.

Bir üst seviyede, entegre gate driver'lı buck kontrolörleri yer alır. Bu entegreler high-side ve low-side MOSFET'leri sürebilecek sürücü katlarını içerir. Senkron buck mimarileri bu sınıfta yaygındır. Gate sürüş zamanlaması, dead-time ve koruma fonksiyonları entegre tarafından optimize edildiği için hem tasarım süresi kısalır hem de güvenilirlik artar.

En yüksek entegrasyon seviyesinde ise entegre anahtarlama buck regülatörler bulunur. Bu tip entegrelerde güç MOSFET'leri de entegre içerisine gömülüdür. Harici olarak genellikle yalnızca indüktör, giriş/çıkış kapasitörleri ve birkaç pasif bileşen kullanılır. Düşük ve orta güç seviyelerinde kompakt, düşük maliyetli ve hızlı geliştirilebilir çözümler sunar. Ancak MOSFET parametreleri sabit olduğu için yüksek akım veya özel verim hedefleri olan tasarımlarda esneklik sınırlıdır.

Buck IC'lerinin iç yapısı incelendiğinde, temel olarak birkaç ana fonksiyon bloğu görülür. Geri besleme (feedback) bloğu, çıkış gerilimini referans gerilimle karşılaştırarak hata sinyali üretir. Bu hata sinyali, PWM modülatörüne iletilerek duty cycle ayarlanır ve çıkış gerilimi regüle edilir. Referans gerilimi (V_{ref}) genellikle entegre içerisinde üretilir ve sıcaklık ile besleme değişimlerine karşı karardır.

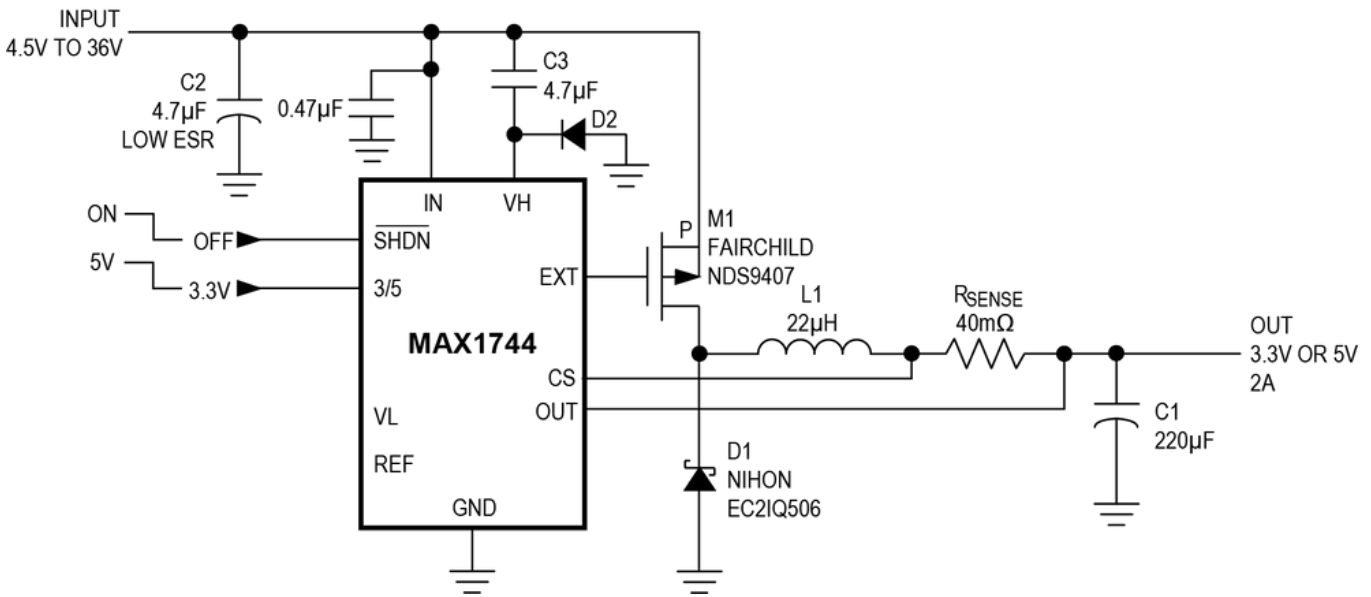
PWM üretimi, kontrol metoduna bağlı olarak farklı şekillerde gerçekleştirilir. En yaygın yöntemler voltage-mode ve current-mode kontroldür. Voltage-mode kontrolde duty cycle yalnızca gerilim hatasına bağlıdır ve kompanzasyon ağı daha karmaşıktır. Current-mode kontrolde ise endüktör akımı doğrudan veya dolaylı olarak geri beslenir; bu sayede daha hızlı transient cevap ve daha basit kompanzasyon sağlanır. Modern buck entegrelerinin büyük çoğunluğu current-mode veya türevlerini kullanır.

Senkron buck entegrelerinde, kontrolör aynı zamanda tamamlayıcı gate sürüş sinyalleri üretir. High-side ve low-side MOSFET'ler arasında shoot-through'u önlemek için entegre içinde dead-time eklenir. Bazı entegrelerde bu süre sabittir, bazılarında ise yük koşullarına göre adaptif olarak ayarlanır. Hafif yük durumlarında verimi artırmak için senkron MOSFET'in kapatılarak diyot benzeri davranış sergilediği "diode emulation" veya "pulse skipping" modları da sıklıkla bulunur.

Buck IC'lerinin bir diğer önemli yönü koruma fonksiyonlarıdır. Tipik olarak aşırı akım koruması (OCP), aşırı gerilim koruması (OVP), düşük gerilim kilitlemesi (UVLO) ve termal kapanma (TSD) entegre içerisinde yer alır. Bu korumalar, hem entegreyi hem de bağlı yükü arıza durumlarına karşı korur ve endüstriyel uygulamalarda vazgeçilmezdir.

Entegre seçimi yapılırken yalnızca elektriksel parametreler değil, sistem gereksinimleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Giriş gerilim aralığı, maksimum çıkış akımı, anahtarlama frekansı, senkron veya asenkron mimari desteği ve harici bileşen sayısı temel seçim kriterleridir. Yüksek anahtarlama frekansı daha küçük indüktör ve kapasitör kullanımına olanak tanırken, anahtarlama kayıplarını artırır. Düşük frekans ise daha yüksek verim sağlar ancak pasif bileşen boyutlarını büyütür. Bu denge çoğu zaman buck IC'nin izin verdiği frekans aralığı ile belirlenir.

Sonuç olarak buck regülatör entegresi, yalnızca bir kontrol elemanı değil, güç katının davranışını tanımlayan merkezi bir bileşendir. Düşük güçlü ve kompakt çözümler için entegre anahtarlama regülatörler yeterli olurken, yüksek akım ve yüksek verim gerektiren uygulamalarda harici MOSFET'li kontrolör mimarileri tercih edilir. Bu dokümanda daha önce verilen tüm tasarım parametreleri ve hesaplamalar, seçilen buck IC'nin desteklediği çalışma modu ve mimari dikkate alınarak değerlendirilmelidir.



Şekil 5. Analog Devices firmasına ait MAX1744 Buck Converter IC referans devresi

Sonuç

Bu dokümanda buck dönüştürücü topolojisi, temel çalışma prensibinden başlayarak CCM tabanlı tasarım yaklaşımı çerçevesinde kapsamlı ve mühendislik odaklı biçimde ele alınmıştır. Duty cycle, anahtarlama frekansı ve iletim modlarının; indüktör, giriş-çıkış kapasitörleri ve güç anahtarları üzerindeki elektriksel ve termal etkileri açıklanmış, tasarımın yalnızca teorik denklemlerden ibaret olmadığı vurgulanmıştır.

Bileşen seçimlerinde ESR, ripple akımı, doyum akımı ve anahtarlama kayıpları gibi pratik parametrelerin sistem verimliliği ve güvenilirliği üzerindeki belirleyici rolü ortaya konmuştur. Asenkron ve senkron mimariler karşılaştırılarak, özellikle düşük çıkış gerilimi ve yüksek akım uygulamalarında senkron doğrultmanın sağladığı verim avantajı netleştirilmiştir. Ayrıca buck kontrolör entegrelerinin entegrasyon seviyeleri ve kontrol yöntemleri incelenerek, uygulama gereksinimlerine uygun IC seçiminin tasarımın performansını doğrudan etkilediği gösterilmiştir.

Sonuç olarak, yüksek verimli ve güvenilir bir buck dönüştürücü tasarımı; doğru teorik hesapların, uygun bileşen seçiminin, optimize edilmiş anahtarlama parametrelerinin ve dikkatli PCB yerleşiminin birlikte ele alınmasını gerektirir. Bu doküman, lineer ve sezgisel tasarımların ötesine geçerek, endüstriyel seviyede, tekrarlanabilir ve optimize edilebilir buck dönüştürücü tasarımları için sağlam bir mühendislik referansı sunmaktadır.

Kaynakça

1. Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage (Rev. B)-Texas Instruments
2. STSPIN32G4 – Buck converter design guidelines - Application note-STMicroelectronics
3. Buck Converter Design and Feedback Controller Using Core Independent Peripherals-Microchip
4. Buck Power Stage Design Equations-Analog Devices
5. electronics.stackexchange.com
6. Power Electronics - Muhammad H.Rachid
7. Güç Elektroniği Ders Notları - Tarık Erfidan