

Kandidatprogrammet i elektroteknik

Analys av LED-drivdon med effektfaktor-korrigerering

Beskrivning av uppbyggnad och verkningsätt

Casimir von Knorring

Copyright ©2025 Casimir von Knorring

Författare Casimir von Knorring

Titel Analys av LED-drivdon med effektfaktorkorrigerings

Utbildningsprogram Kandidatprogrammet i elektroteknik

Huvudämne Elektronik och elektroteknik

Övervakare Lektor Markus Turunen

Handledare Professor Jorma Kyyrä

Datum 8.12.2025

Sidantal 25 + 5

Språk Svenska

Sammandrag

I takt med att LED-belysning ersätter konventionella ljuskällor såsom glödlampor och fluorescerande lysrör, ökar även behovet av effektiva och tillförlitliga drivdon. Dessa är anpassade för att garantera en jämn strömtillförsel till LED-armaturer och på så sätt förbättra livslängden, effektiviteten samt styrbarheten hos lysdioder. Detta arbete analyserar funktionen och strukturen hos LED-drivdon som är baserade på switch-mode-omvandlare, med särskilt fokus på hur de upprätthåller en stabil och effektiv strömtillförsel till lysdioder. Inledningsvis presenteras den teori som anknyter till drivdonets funktion, vilket utgör grunden för den efterföljande, mer fördjupade analysen. Genom att analysera olika switch-mode-omvandlare och deras roll vid strömreglering belyses hur drivdonen formar och anpassar den inkommande spänningen efter lysdiodens behov.

Arbetet redogör även för effektfaktorkorrigeringsens betydelse, särskilt med avseende på hur ett integrerat effektfaktorkorrigeringssteg kan minska harmonisk distorsion och därigenom förbättra effektfaktorn. Vidare behandlas drivdonets övergripande struktur samt olika omvandlartopologiers inverkan på drivdonets prestanda, kostnad och komplexitet. Arbetet innefattar en produktanalys av en utvald produkt som innehåller ett LED-drivdon. Analysen ger en konkret och tillämpbar förståelse för hur de behandlade principerna realiserar i en faktisk utformning av ett LED-drivdon. Genom denna helhetsöversikt klargörs de centrala principerna bakom moderna LED-drivdon samt de avvägningar som krävs för att uppnå hög energieffektivitet och lång livslängd.

Nyckelord Lysdiod (LED), LED-drivdon, switch-mode-omvandlare, effektfaktorkorrigerings

Author	Casimir von Knorring	
Title of thesis	Analysis of LED drivers with power factor correction	
Programme	Bachelor's Programme in Electrical Engineering	
Major	Electronics and Electrical Engineering	
Thesis supervisor	Senior Lecturer Markus Turunen	
Thesis advisor(s)	Professor Jorma Kyyrä	
Date	Number of pages	Language
8.12.2025	25 + 5	Swedish

Abstract

As LED lighting continues to replace conventional light sources such as incandescent bulbs and fluorescent tubes, the demand for efficient and reliable drivers is increasing. These drivers are designed to ensure a stable current supply to LED luminaires, thereby improving the lifetime, efficiency, and controllability of the LEDs. This work examines the function and structure of LED drivers based on switch-mode converters, with particular focus on how they provide stable and efficient power delivery to LEDs. Initially, the theory related to the operation of the driver is presented, forming the basis for the subsequent, more in-depth analysis. By analyzing the driver's various switch-mode converters and their role in current regulation, the study highlights how the driver shapes and adapts the incoming voltage to meet the requirements of the LED. By analyzing various switch-mode converters and their role in current regulation, the study highlights how the driver shapes and adapts the incoming voltage to meet the requirements of the LED.

The work also addresses the importance of power factor correction, particularly regarding how an integrated power-factor-correction stage can reduce harmonic distortion and thereby improve power quality. Furthermore, the overall structure of the driver is examined, as well as how different converter topologies influence its performance, cost, and complexity. The work includes a product analysis of a selected product based on an LED driver. This analysis provides a concrete and applicable understanding of how the discussed principles are realized in an actual design. Through this comprehensive overview, the central principles behind modern LED drivers are clarified, along with the trade-offs required to achieve high energy efficiency and long service life.

Keywords Light-emitting diode (LED), LED driver, switch-mode converter, power factor correction

Innehåll

Förord	6
Symboler och förkortningar	7
Symboler	7
Förkortningar.....	7
1 Inledning	8
2 Teoretisk bakgrund om lysdioden och drivdon	9
2.1 Lysdiodens funktion och egenskaper	9
2.2 LED-drivdonets funktionsprincip	10
2.2.1 EMI-filtrering och likriktning	10
2.2.2 DC/DC-omvandlare.....	11
2.2.3 Resonanskretsar	12
2.2.4 Styrning med pulsbreddmodulering.....	13
2.2.5 Effektfaktorkorrigerings	14
3 Strukturer och topologier hos LED-drivdon.....	16
3.1 Grundläggande switchande omvandlartopologier: Buck och Boost 16	
3.1.1 Buck-omvandlare	16
3.1.2 Boost-omvandlare	17
3.2 Effektfaktorkorrigerings med boost-omvandlare	18
3.3 Isolering och resonanta switch-mode-omvandlare.....	19
3.3.1 Flyback-omvandlare	19
3.3.2 Resonanta omvandlare och nollspänningsväxling	20
3.4 Val av kretsarkitektur och komponentvärden.....	21
3.4.1 Dimensionering av huvudkomponenter	21
3.4.2 Omvandlartopologier och struktur	22
4 Produktanalys.....	24
4.1 Effektfaktorkorrigeringssteget.....	24
4.2 Det resonanta strömregleringssteget	26
5 Sammanfattning.....	28
Källhänvisningar.....	29

Förord

Jag vill tacka min handledare professor Jorma Kyyrä för det stöd och den vägledning jag fått under arbetets gång.

Otnäs 8.12.2025
Casimir von Knorring

Symboler och förkortningar

Symboler

V	Spänning
I	Ström
R	resistans
Z	impedans
L	induktans
C	kapacitans
D	arbetscykel

Förkortningar

AC	växelspänning
DC	likspänning
EMI	elektromagnetisk interferens
LED	lysdiod
DCM	diskontinuerligt driftläge
CCM	kontinuerligt driftläge
BCM	gränsläge

1 Inledning

Lysdioden är ett högaktuellt och snabbt utvecklande område inom modern belysningsteknik. Effektivitet, livslängd, flexibla färgblandningsmöjligheter, ljuseffekt och hållbarhet är några av de egenskaper som gjort att lysdioden slagit igenom[1]. I och med lysdioders karakteristiska egenskaper bör de förses med en så stadig ström som möjlig, vilket skapar behovet av drivdon speciellt ämnade för drift av lysdioder. Drivdonets grundläggande funktion är sålunda att omvandla en varierande inkommande ström till en av spänningsförändringar oberoende likström. Detta kan kompletteras med effektfaktorkorrigeringsfunktion, vilket innebär att effektfaktorn optimeras då förhållandet mellan den verkliga och den skenbara effekten förbättras. För såväl strömregleringen som för effektfaktorkorrigeringen i LED-drivdon utnyttjas ofta switchande strömförsörjning som fungerar med snabbt växlande transistorer i så kallade switch-mode-omvandlare. Beroende på ändamålet utnyttjas switch-mode-omvandlare av olika typ med olika topologier i LED-drivdon.

Detta kandidatarbete redogör för LED-drivdonets grundläggande funktion och uppbyggnad, med vikt på effektfaktorkorrigeringen och drivdonets övergripande syfte. Arbetet baseras på en litteraturöversikt som omfattar vetenskapliga forskningsartiklar samt relevant kursmaterial. De centrala forskningsfrågorna är

- Hur fungerar ett LED-drivdon och vilken funktion har det?
- Vad innebär effektfaktorkorrigeringsfunktion?
- Vilka olika typer av LED-drivdon finns det och vilka är deras respektive för- och nackdelar?
- Vilka utmaningar förekommer inom konstruktionen av LED-drivdon och vilka är deras lösningar?

Arbetet är uppdelat så att kapitel 1 utgör en introduktion av arbetet. Kapitel 2 behandlar bakgrund och teori kopplad till lysdiodens funktion samt drivdonets olika beståndsdelar. I kapitel 3 implementeras teorin från kapitel 2 för att beskriva olika topologier hos switch-mode-omvandlare samt deras för- och nackdelar. Kapitel 4 består av en produktanalys där en utvald produkt som innehåller ett LED-drivdon analyseras med hjälp av den information och teori som presenterats i de tidigare kapitlen. Slutligen utgör kapitel 5 en sammanfattning av arbetet.

2 Teoretisk bakgrund om lysdioden och drivdon

I detta kapitel ges grundlig teori om de olika beståndsdelarna hos ett led-drivdon. Till att börja med behandlas lysdiodens funktion och dess egenskaper samt vilka villkor som bör uppfyllas för att effektivt driva en lysdiod. Analysen övergår därefter till en strukturerad genomgång av LED-drivdonets funktion, där dess delsystem redovisas i enlighet med energiflödet från nätanlutning till last.

2.1 Lysdiodens funktion och egenskaper

Som namnet antyder är lysdioden en diod, det vill säga en halvledarkomponent som karaktäriseras av att den leder elektrisk ström i endast en riktning. Denna egenskap uppnås genom så kallad dopning, vilket går ut på att man förser ett halvledande ämne med ett material som ger upphov till ett elektronunderskott (P-typ) eller överskott (N-typ) i ämnet. I en diod utgör en dopad halvledare av N-typ katoden och en dopad halvledare av P-typ anoden, vilka sammanfogas för att ge upphov till ett P-N-gränsskikt mellan materialen. För att en ström ska kunna passera detta gränsskikt krävs att en särskild framspänning förses över dioden samt att diodens katod är ansluten till den negativa spänningen och anoden till den positiva. De fria elektronerna i N-typ-materialet kommer då att passera gränsskiktet in i P-typ-materialet medan de elektronfria ”hålén” passerar in i N-typ-materialet. Framspänningen är framåtriktad i detta läge och dioden leder därmed ström. Då spänningen är bakåtriktad och katoden är ansluten till den positiva spänningen och anoden till den negativa dras elektronerna i N-typ-material mot den positiva potentialen i utkanten av material och hålén i P-typ-materialen på motsvarande sätt mot den negativa potentialen. Detta leder till att gränsskiktet i dioden växer och bildar ett så kallat uttömningsområde, vilket innebär att ingen ström kan passera[2, kapitel 3, 3, kapitel 2].

En lysdiodes egenskap att alstra ljus bygger på diskreta energinivåer mellan vilka elektronerna rör sig då deras energi ändras i samband med att en spänning appliceras över dioden. Då en elektron förlorar energi och därmed faller från den ledande nivån till en lägre energinivå alstras vanligen en foton, vilket ger upphov till ljus[4]. Beroende på vilka typer av halvledarmaterial som används i lysdioden kan olika färger av ljus uppnås. För röda och gröna lysdioder används galliumarsenidfosfid och för blåa används indiumgalliumnitrid. En kombination av rött, grönt och blått uppfattas som vitt ljus av mänskligt ögat. Denna effekt har utökat lysdiodens användningsområden avsevärt, särskilt inom skärmteknik[2, kapitel 3].

Framspänningen i lysdioder varierar för olika halvledarmaterial och därmed för olika färger. För röda lysdioder är framspänningen ungefär 2 V medan den är cirka 3,5 V för blåa. Framspänningen är även beroende av framströmmen på grund av en ekvivalent serieresistans i lysdioden. Däremot är denna förhållandevis låg, vilket gör att en lysdiod i det närmaste kan beskrivas som en konstantspänningslast[2]. Detta innebär att för en liten förändring i framspänningsfallet över lysdioden ökar strömmen genom den avsevärt, vilket kan antydans i ekvationen

$$I_F = I_S(e^{eV_F/KT} - 1) \quad (1)$$

som beskriver förhållandet mellan framspänningen och framströmmen[1]. I_F utgör framströmmen, I_S är mätnadsströmmen, e är elementarladdningen, V_F är framspänningen, K är Boltzmanns konstant och T är temperaturen. Ytterligare kan man konstatera att temperaturen är omvänt proportionerlig mot framspänningen, vilket innebär att spänningsfallet över lysdioden sjunker då dess temperatur ökar. Detta leder i sin tur till att strömmen ökar och att temperaturen stiger ytterligare, vilket slutligen kan leda till att lysdioden överhettas och förstörs. I och med detta drivs lysdioder i regel med strömkällor som förser lysdioden med en stadig ström och på så sätt skyddar lysdioden från överhettning[1, 4].

2.2 LED-drivdonets funktionsprincip

I delkapitel 2.1 om lysdiodens funktion och egenskaper framkom att lysdioder i allmänhet drivs av strömkällor, vilket innebär att strömtillförseln till lysdioden bibehålls oberoende av eventuella spänningsförändringar. För att uppnå detta används vanligen särskilda drivdon som omvandlar den inkommande oreglerade strömmen och anpassar den efter lysdiodens behov. I detta kapitel beskrivs på ett teoretiskt plan i ordningsföljd, hur denna omvandling sker. Detta innefattar likriktning, strömreglering, effektfaktorkorrigering och styrning.

2.2.1 EMI-filtrering och likriktning

För LED-drivdon som är nätanslutna och därmed förses med växelspanning utgör filtrering av elektromagnetisk interferens (EMI) det första steget. Elektromagnetisk interferens uppstår i samband med att snabba spänningsförändringar förekommer i en krets, vilket i allmänhet ökar belastningen på elnätet. Dessa förändringar orsakas exempelvis av snabbt växlande transistorer, vilka ofta förekommer i LED-drivdon. För att minska denna

interferens placeras ett LC-lågpassfilter vid drivdonets ingång, vars impedans är anpassat så att harmoniska komponenter inte kan passera. Därtill skyddar filtret själva kretsen från plötsliga spänningsförändringar i ingångsspänningen[2, kapitel 13].

För LED-armaturer som drivs med likström men som är nätanslutna bör den växlande ingångsspänningen omvandlas till likspänning. Detta uppnås i allmänhet med hjälp av en likriktarbrygga som placeras direkt efter EMI-filtret.

2.2.2 DC/DC-omvandlare

I det förgående avsnittet behandlades likriktare som omvandlar växelspänning till likspänning. En DC/DC-omvandlare omvandlar däremot likspänning till en för ändamålet begränsad och reglerad likspänning. Vad gäller LED-drivdon är det däremot strömmen genom lysdioden som bör regleras. Detta uppnås genom att kontinuerligt mäta strömmen genom lasten, i detta fall lysdioden, med exempelvis ett litet motstånd som återkopplas till DC/DC-omvandlaren genom en styrkrets. Styrkretsen styr sedan omvandlaren enligt ett särskilt styrschema för att bibehålla en stadig ström[5].

DC/DC-omvandlare kan delas in i två grupper: linjära och switch-mode. Linjära omvandlare implementeras i fall där skillnaden mellan källspänningen och spänningen över lasten är förhållandevis liten, exempelvis vid lågeffektapplikationer. De begränsar nämligen strömmen till lasten med hjälp av energilagrande komponenter[6]. Detta innebär lägre EMI då inga snabba spänningsförändringar förekommer. Därtill är strukturen hos linjära omvandlare vanligen okomplicerad, vilket gör att de är kostnadseffektiva. Linjära omvandlare är däremot ofta stora till storleken då stora komponenter krävs för att de ska fungera effektivt. Dessutom krävs vanligen en kylfläns för att avleda värmen som uppstår i de resistiva komponenterna, vilket ytterligare försämrar storleken[2, kapitel 4].

De flesta moderna LED-drivdon använder switchande strömförsörjning, vilket innebär att DC/DC-omvandlarna som implementeras är av switch-mode-typ. Dessa består av en snabbt växlande transistor som med hög frekvens bryter och slår på strömmen och på så sätt reglerar strömmen till lasten. För att uppnå en tillräckligt hög frekvens, i allmänhet mellan 20 kHz och 2 MHz, används i allmänhet transistorer av MOSFET-typ i led-drivdon. Dessa har förmågan att växla tillstånd med hög frekvens med förhållandevis låga förluster. Switch-mode-omvandlare är särskilt användbara om skillnaden mellan källspänningen och spänningen över lysdioden är stor.

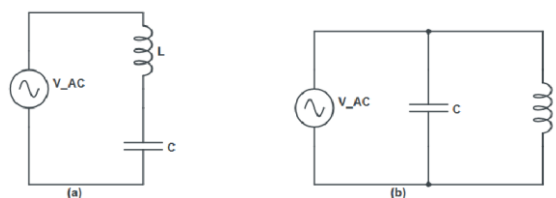
Utöver transistorn ingår även en spole i en typisk switch-mode-omvandlare. Spolens förmåga att motverka snabba strömförändringar utnyttjas för att jämna ut utgångsströmmen samt för att ge omvandlaren förmågan att anpassa utgångsspänningen. Olika topologier för switch-mode-omvandlare kan implementeras för att såväl öka spänning (step-up) som begränsa den (step-down). Regleringen av spänningen med hjälp av switch-mode-omvandlare sker med pulsbreddmodulering, vilket beskrivs i avsnitt 2.2.4[7, kapitel 1].

2.2.3 Resonanskretsar

Resonanskretsar utnyttjas ofta som lågpas- och högpasfilter, vilka filtrerar bort särskilda frekvenser. Därtill är vissa typer av switch-mode-omvandlare baserade på resonanskretsar med syftet att minska omkopplingsförlusterna och öka effekten hos omvandlarna. Dessa så kallade resonansomvandlare är konstruerade så att spänningen över transistorn minimeras vid växlingsögonblicket[8]. För att bättre förstå denna typ av omvandlare som behandlas i avsnitt 3.3, behandlar detta avsnitt teorin bakom resonanskretsar.

Resonanskretsar består av energilagrande komponenter i form av kondensatorer och spolar. Deras egenskap att lagra elektrisk energi i elektriska och magnetiska fält utnyttjas i resonanskretsar för att uppnå en särskild resonans hos energin.

Beroende på hur kondensatorn och spolen är kopplade i förhållande till varandra har resonanskretsen olika egenskaper. Ifall kondensatorn och spolen är seriekopplade är resonanskretsens impedans minimal vid resonansfrekvensen. En ideal serieresonanskrets motsvarar en kortslutning vid sin resonansfrekvens. Ifall komponenterna är parallellkopplade är impedansen i stället maximal vid resonansfrekvensen. En ideal parallellresonanskrets motsvarar därmed en öppen krets vid sin resonansfrekvens. I figur 1 presenteras kopplingsschemat för en seriekopplad resonanskrets och en parallell resonanskrets[9].



Figur 1. a) serieresonanskrets, b) parallellresonanskrets

Genom att omsorgsfullt passa ihop en spoles induktans med en kondensators kapacitans som är sinsemellan serie- eller parallellkopplade, växlar energin

mellan dessa med en särskild resonansfrekvens. Resonansfrekvensen f_0 hos en resonanskrets bestående av en spole och en kondensator beräknas med hjälp av ekvationen

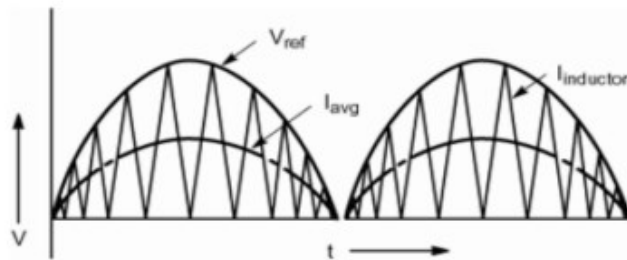
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

där f_0 utgör resonansfrekvensen, L är spolens induktans och C är kondensatorns kapacitans. Resonansfrekvensen för både serieresonanskretsar och parallellresonanskretsar bestående av en spole och en kondensator beräknas med ekvation (2).

2.2.4 Styrning med pulsbreddmodulering

För att med hjälp av switch-mode-omvandlare kunna bibehålla en stadig ström genom lysdioden krävs en styrkrets som styr omvandlaren utefter strömmen genom lysdioden. Detta innebär att strömmen genom lysdioden oavbrutet mäts för att sedan jämföras med en referensström. Styrkretsen skapar därigenom en kontrollsignal som slår av och på transistorn med sådana intervall att medelströmmen till lysdioden bibehålls[1].

Styrningen av omvandlare fungerar alltså genom pulsbreddsmodulering. Detta innebär att en oreglerad ingångsspänning kan regleras genom att en switch-mode-omvandlare kontinuerligt slår på och av spänningen med särskilda tidsintervall för att skapa en reglerad ström som motsvarar medeltalet av strömmen under intervallen. I figur 2 visas den varierande strömmen genom omvandlarens spole samt den motsvarande medelströmmen som i detta fall följer fasen hos en referensspänning. För att forma denna signal efter behovet, regleras omvandlarens arbetscykel, det vill säga längden på intervallet då transistorn är påslagen i förhållande till längden på hela cykeln. Transistorns höga frekvens ger däremot upphov till strömripping, vilket innebär högfrekventa förändringar i utgångsström. För att eliminera rippel placeras en kondensator parallellt med lasten som slätar ut strömmen. Att den pulserande strömmen som visas i figur 2 inte är kvadratisk till formen beror på spolens energilagrande verkan i drivdonet.



Figur 2. Strömmen och medelströmmen genom spolen i en switch-mode-omvandlare. V_{ref} utgör en referensspänning, $I_{inductor}$ utgör strömmen genom omvandlarens spole och I_{avg} utgör medelströmmen genom omvandlarens spole[4].

Beroende på formen hos strömmen genom omvandlarens spole kan tre olika driftlägen hos switch-mode-omvandlaren definieras. Dessa är kontinuerligt läge (CCM), diskontinuerligt läge (DCM) och gränsläge (BCM). CCM innebär att strömmen genom spolen alltid är högre än noll medan DCM innebär att denna ström under ett kort tillfälle faller till noll under varje cykel. Strömformen i figur 1 är ett exempel på BCM, vilket utgör ett övergångstillstånd mellan CCM och DCM. I detta läge påbörjas en ny cykel exakt då strömmen faller till noll[7, kapitel 1].

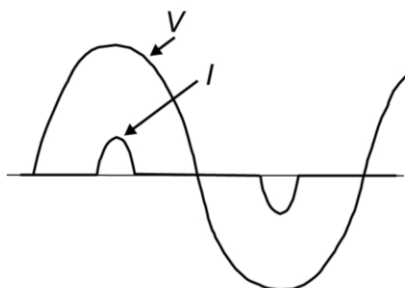
Förutom att magnituden på strömmen kan kontrolleras med pulsbreddmodulering kan även fasen hos en växlande ström regleras, vilket framför allt utnyttjas vid effektfaktorkorrigerings.

2.2.5 Effektfaktorkorrigerings

I kretsar som använder en växelspanningskälla, exempelvis elnätet, beskriver effektfaktorn förhållandet mellan den verkliga effekten och skeneffekten. Detta förhållande försämras då en del av effekten går förlorad som reaktiv effekt, vilket är fallet för aktiva laster där energilagrande komponenter ingår. Dessa orsakar en färförskjutning mellan ingångsspänningen och ingångsströmmen samt introducerar harmoniska komponenter, vilket försämrar den totala harmoniska distorsionen[2, kapitel 8].

LED-drivdon utgör en aktiv last, där ingångsströmmen likriktas och jämnas ut med hjälp av en kondensator som laddas upp vid spänningens toppvärde. Detta gör att den inkommande strömmen varken är sinusformad eller i fas med nätspänningen, vilket orsakar harmonisk distorsion och därmed en sämre effektfaktor. Detta kan antydans i figur 3 som visar strömmen genom likriktarbryggan jämfört med ingångsspänningen. För att bibehålla en hög effektfaktor implementeras ett effektfaktorkorrigeringssteg i LED-drivdon

som jämnar ut ingångsströmmen för att bättre efterlikna den sinusformade ingångsspänningen. [2, kapitel 8].



Figur 3. V utgör nätspänningen och I strömmen genom likriktarbryggan[2, kapitel 10].

Effektfaktorkorrigeringssteget kan delas in i två huvudtyper: passiv och aktiv. Passiv effektfaktorkorrigerering innebär att distorsionen i inspänningen minskas genom att harmoniska komponenter filtreras bort med hjälp av ett LC-filter i insteget. Detta innebär att ingen styrkrets är nödvändig, vilket minskar kostnaderna. Därtill uppstår ingen EMI, då filtret fungerar linjärt utan att orsaka stora spänningsförändringar. Däremot krävs ofta stora komponenter för att en godtycklig förbättring av effektfaktorn ska uppnås. Därmed är aktiv effektfaktorkorrigerering mera förekommande i och med dess avsevärt högre prestanda vad gäller förbättrandet av effektfaktorn. För aktiv effektfaktorivering i LED-drivdon utnyttjas precis som för strömregleringen switch-mode-omvandlare. Beroende på ändamålet kan olika topologier och strukturer vad gäller effektfaktorkorrigeringssteget och strömregleringssteget implementeras[10].

3 Strukturer och topologier hos LED-drivdon

I detta kapitel analyseras till att börja med olika topologier och typer av switch-mode-omvandlare samt hur dessa utnyttjas för såväl strömreglering som effektfaktorkorrigerings. Detta innefattar en fördjupning i topologiernas funktion samt deras respektive användningsområden. Därtill behandlas olika varianter av LED-drivdon vad deras struktur och funktion beträffar. Slutligen diskuteras hur komponenter samt struktur bör väljas för att optimera funktionaliteten hos drivdonet.

3.1 Grundläggande switchande omvandlartopologier: Buck och Boost

I avsnitt 2.2.2 som behandlar switch-mode-omvandlare, framkom det att dessa används såväl för strömreglering som för effektfaktorkorrigerings i LED-drivdon. Med hjälp av en snabbt växlande MOSFET-transistor kan den inkommande spänningen regleras med pulsbredmodulering. En spole upprätthåller kontinuiteten hos energiflödet till lysdioden medan en kondensator slutligen minskar rippeln[7, kapitel 1]. Beroende på hur dessa komponenter är kopplade i förhållande till varandra kan olika topologier med olika egenskaper uppnås. I följande avsnitt behandlas två vanliga icke-isolerade topologier: buck och boost. Galvanisk isolation och isolerade omvandlare samt resonanta omvandlare behandlas i avsnitt 3.3.

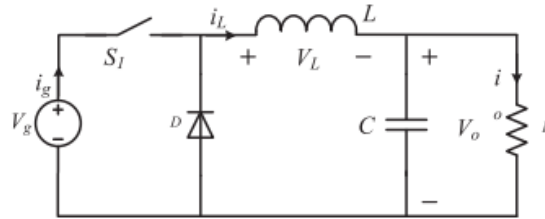
3.1.1 Buck-omvandlare

Buck-omvandlaren eller step-down omvandlaren utnyttjas då utgångsspänningen bör vara lägre än ingångsspänningen. Figur 4 visar kopplingsschemat för en buck-omvandlare där transistorn ersatts med en avbrytare S_1 för att tydligare visa omvandlarens funktion. Då avbrytaren är påslagen (det vill säga under transistorns arbetscykel) går en ström genom spolen L och vidare till lasten R . Ekvationen

$$V_L = L \frac{di}{dt} \tag{3}$$

uttrycker förhållandet mellan spänningen över en spole och strömmen genom den över tid. V_L utgör spänningen över spolen, L är spolens induktans och di/dt utgör strömmens tidsderivata. Enligt denna ekvation kan konstateras att en snabb strömförändring ger upphov till en hög spänning över spolen, vilket följaktligen innebär att spolen motarbetar snabba

strömförändringar. Detta resulterar i att en del av energin lagras i spolens magnetfält, vilket följaktligen begränsar strömmen till lasten.



Figur 4. Buck-omvandlare[1].

När avbrytaren sedan öppnas och bryter strömmen motverkar spolen åter denna förändring och bibehåller därmed en ström genom lasten och dioden D som i detta läge blir strömförande. Kondensatorn C är anpassad så att den minskar spänningsrippeln som uppstår i samband med transistorens arbetscykel. Beroende på spolen och frekvensen hos transistoren kan buck-omvandlare fungera i CCM, DCM samt BCM-läge. [2, kapitel 5].

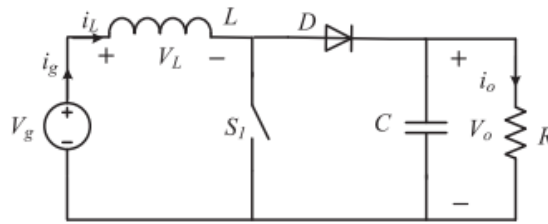
Genom att justera arbetscykeln hos transistoren kan förhållandet mellan ingångsspänningen och utgångsspänningen förändras. Detta sker i enlighet med överföringsfunktionen för buck-omvandlare

$$\frac{V_o}{V_{IN}} = D \quad (4)$$

där D utgör arbetscykeln, V_o utgör utgångsspänningen och V_{IN} utgör ingångsspänningen. Exempelvis innebär en arbetscykel på 50% att utgångsspänningen är hälften av ingångsspänningen.

3.1.2 Boost-omvandlare

Boost-omvandlaren eller step-up omvandlaren utnyttjas då utgångsspänningen bör vara högre än ingångsspänningen. Figur 5 visar kopplingschema för en boost-omvandlare där transistoren ersatts med en avbrytare S_I . Till skillnad från buck omvandlaren är transistoren kopplad mot den negativa potentialen, vilket innebär att strömmen i ingångssidan är kontinuerlig. Genom att placera spolen L på ingångssidan lagrar den energi under transistorens arbetscykel. Under arbetscykeln blockeras strömmen till utgången av dioden D . När transistoren sedan öppnas blir dioden strömförande och den lagrade energin i spolen frigörs, vilket ger upphov till en hög spänning som laddar upp kondensatorn C . Utgångsspänningen fortsätter stiga fram tills att medelströmmen genom spolen och strömmen genom lasten hamnar i balans[2, kapitel 6].



Figur 5. Boost-omvandlare[1].

Liksom för buck-omvandlaren kan förhållandet mellan ingångs- och utgångsspänningen justeras genom att ändra transistorens arbetscykel. Överföringsfunktionen för boost-omvandlare som opererar i CCM

$$\frac{V_o}{V_{IN}} = \frac{1}{1 - D} \quad (5)$$

visar detta förhållande. D utgör arbetscykeln, V_o utgör utgångsspänningen och V_{IN} utgör ingångsspänningen. Enligt överföringsfunktionen bör utgångsspänningen alltid vara högre än ingångsspänningen, vilket även kan konstateras i kopplingsschemat där dioden D förhindrar strömmen från att passera från utgångssidan tillbaka till ingångssidan. I och med detta implementeras boost-omvandlare i regel om förstärkningsförhållande är minst 1,5 för att säkerställa att utgångsspänningen alltid är högre än ingångsspänningen[2, kapitel 6].

Även boost-omvandlaren kan operera i CCM, DCM samt BCM-läge. Däremot begränsas användningen av CCM för boost-omvandlare av att förstärkningen inte får överstiga 6. Detta beror på att ett stort förstärkningsförhållande innebär en hög arbetscykel. Enligt överföringsfunktionen motsvarar en förstärkning på 6 en arbetscykel på 0,83, vilket följaktligen betyder att spolen får mycket kort tid på sig att ladda ur sin energi till utgången. Därmed bör DCM utnyttjas vid högre förstärkning för att undvika alltför hög ström genom spolen[2, kapitel 6].

3.2 Effektfaktorkorrigerig med boost-omvandlare

Utöver att boost-omvandlare används till spänningsförstärkning används dessa även för effektfaktorkorrigerig. Omvandlarens förstärkande egenskap utnyttjas då till att formge ingångsspänningen så att en bättre effektfaktor uppnås. Därutöver har omvandlarens spole, som placerad på ingångssidan, en brusreducerande verkan på ingångsspänningen, vilket minskar den totala

harmoniska distorsionen genom att dämpa variationerna i ingångsspänningen och ingångsströmmen[1].

I allmänhet verkar en boost-omvandlare ämnad för effektfaktorkorrigerings i BCM-läge. I detta gränsläge sjunker strömmen genom omvandlarens spole till noll då transistorn är öppen. I samma stund som strömmen blir noll växlar transistorn och blir strömförande, vilket inleder en ny period. Detta medför en del fördelar, exempelvis krävs inte en lika stor spole jämfört med om omvandlare skulle verka i CCM-läge. I och med att transistorn växlar läge då strömmen genom spolen är noll är en styrkrets för uppföljning av denna ström inte nödvändig. I stället används nollströmdetektering, vilket innebär en mindre komplex krets som känner av när strömmen genom spolen blir noll. Därtill uppstår mindre förluster i samband med omkopplingen av transistorn då strömmen i detta ögonblick är noll[6].

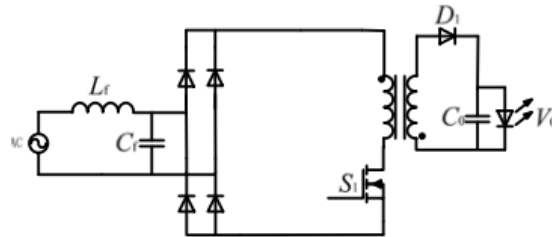
I avsnitt 2.2.4 om teori kopplad till effektfaktorkorrigerings, konstaterades att en fasförskjutning mellan ingångsspänningen och ingångsströmmen försämrar effektfaktorn. Sålunda är effektfaktorkorrigerande boost-omvandlare anpassade så att ingångsströmmen är sinusformad och i fas med spänningen. Det möjliggörs genom att påslagningstiden hos transistorn är konstant. Därigenom bildar strömtopparna under påslagningstiden en i det närmaste sinusformad signal.

3.3 Isolering och resonanta switch-mode-omvandlare

För att öka driftsäkerheten hos LED-drivdon implementeras även galvaniskt isolerade omvandlare. Dessa isolerar lasten ifrån källan med hjälp av att energin överförs genom induktion mellan en primär och sekundär spole[1]. Kapitlet inleds med en beskrivning av Flyback-omvandlaren som utgör den enklaste typen av isolerad omvandlare. Därtill behandlas även resonanta isolerade omvandlare som utnyttjar en resonanskrets för att förbättra effektiviteten.

3.3.1 Flyback-omvandlare

Flyback-omvandlaren utgör en grundläggande variant av isolerad switch-mode-omvandlare som ofta används i LED-drivdon där lysdioden bör isoleras från spänningskällan. På samma sätt som boost-topologin kan flyback-omvandlare verka i BCM-läge med konstant påslagningstid, vilket innebär att denna topologi också användas för effektfaktorkorrigerings. Figur 6 visar kopplingsschemat för en flyback-omvandlare.



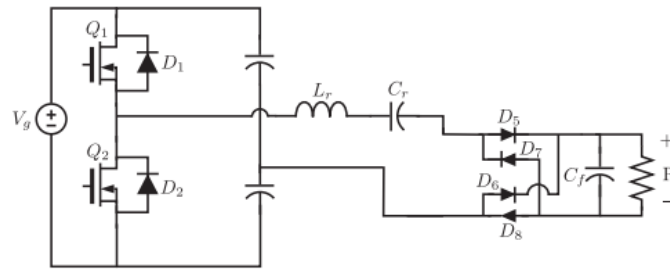
Figur 6. Flyback-omvandlare[1]

Till att börja med filtreras växelspanningen från spänningskällan med ett LC-filter bestående av spolen L_f och kondensatorn C_f för att sedan likriktas med hjälp av en likriktarbrygga. Under arbetscykeln hos transistoren S_1 går ingångsströmmen genom primärspolen samtidigt som den inducerade strömmen i sekundärsidan blockeras av dioden D_1 . När transistoren sedan öppnas frigges den lagrade energin i primärspolen i form av att sekundärspolen blir strömförande i motsatt riktning. Strömmen kan nu passera dioden och ladda upp kondensatorn C_o som driver lysdioden[2, kapitel 9].

3.3.2 Resonanta omvandlare och nollspänningsväxling

En hög växelfrekvens hos transistorerna i switch-mode-omvandlare innebär att mindre komponenter kan implementeras samt att rippeln minskar. Där emot innebär en hög växelfrekvens att förlusterna som uppstår i samband med växlingen ökar, i synnerhet om transistorens drän-källa-spänning är hög i växlingsskedet. För att minska dessa förluster bör spänningen över transistoren vid växlingsögonblicket var så låg som möjligt. Nollspänningsväxling innebär att spänningen över transistoren är noll då den växlar, vilket betyder att ingen eller mycket liten effekt förloras under själva switchögonblicket. För att uppnå nollspänningsväxling används särskilda topologier som utnyttjar resonanskretsar anpassade så att deras resonansfrekvens passar ihop med växlingsfrekvensen hos transistoren.

Figur 7 visar ett exempel på en resonant omvandlare där ingångsspänningen V_g är likriktad. Omvandlaren kan delas in i tre steg där det första utgörs av en halvbrugg bestående av två MOSFET:ar (Q_1 , Q_2). Det andra steget utgörs av själva resonanskretsen som i denna krets består av spolen L_r och en kondensator C_r som är seriekopplade. Därmed är denna krets av typen serie-resonant omvandlare. Slutligen likriktas spänningen i det sista steget som består av en likriktarbrygga.



Figur 7. Serie-resonant LC-omvandlare[11].

De två MOSFET:arna växlar turvis för att ge upphov till en kvadratisk växelspanning. Den kvadratiske spänningen jämnas ut i resonanskretsen, vilket ger upphov till en i det närmaste sinusformad växelspanning. Växelfrekvensen hos transistorerna är anpassad så att de motsvarar resonansfrekvensen hos resonanskretsen. Då Q_1 stängs av upprätthålls den sinusformade växelspanningen av resonanskretsen. Q_2 slås på när växelspanningen passerar noll, vilket innebär att spänningen över Q_2 är nära noll vid växlingen. Cykeln upprepas på motsvarande sätt för Q_1 . Slutligen likriktas spänningen med en likriktarbrygga som laddar utgångskondensatorn C_f med likström. Den utjämnade likspänningen används sedan för att driva lysdioden[11, 12].

Utöver detta exempel bestående av en serie-resonant LC-omvandlare finns flera andra varianter av resonanta switch-mode-omvandlare. Olika resonanskretsar kan implementeras för att ge omvandlaren särskilda egenskaper samt förbättra dess reglerbarhet. Därtill kan resonanta omvandlare isoleras på samma sätt som flyback-omvandlaren. Den isolerande transformatorn passas ihop med resonanssteget och placeras direkt efter det[12].

3.4 Val av kretsarkitektur och komponentvärden

Vid optimeringen av ett LED-drivdon är valet av komponenter och topologier avgörande. Effektivitet, storlek, kostnad, livslängd och prestanda är exempel på egenskaper hos ett LED-drivdon som alla hänger på hur LED-drivdonet är utformat. I detta delkapitel behandlas hur valet av huvudkomponenter och övergripande struktur påverkar drivdonets egenskaper.

3.4.1 Dimensionering av huvudkomponenter

Av praktiska skäl är ett grundläggande krav för LED-armaturer deras storlek som ofta till största del utgörs av själva drivdonet. För att uppnå en lämplig storlek bör så små komponenter som möjligt användas utan att försämra drivdonets prestanda. Bibehållandet av prestanda med mindre komponenter

förutsätter däremot att växelfrekvensen hos transistorn bör vara högre, vilket kan leda till större växlingsförluster.

För buck- och boost-omvandlare gäller därmed att en högre växlingsfrekvens innebär att en mindre spole kan implementeras. Därtill bör även rippeln beaktas vid val av spole. Enligt ekvation

$$L = V_L \frac{dt}{di} \quad (6)$$

som är en omformulering av ekvation (3), är rippeln (di) som uppstår i spolen då spänningen över spolen är lika med V_L proportionerlig mot induktansen L hos spolen. En till storleken mindre spole har i regel en mindre induktans, vilket innebär att en större spole är nödvändig ifall en lägre rippel bör uppnås. Alternativt kan en större utjämnande kondensator implementeras för att minska rippeln.

MOSFET-transistorn bör väljas efter den högsta spänning som denna upplever vid drift. För buck-omvandlare är denna maxspänning lika med ingångsspänningen och för boost-omvandlare är maxspänningen lika med utgångsspänningens maxvärde. För att skydda MOSFET:en bör en skyddsmarginal på 50 % läggas till. Därtill bör dioden i buck- och boost-omvandlare ha samma maxspänning som MOSFET:en[2, kapitel 5-6].

3.4.2 Omvandlartopologier och struktur

Beroende på behovet bör strukturen hos drivdonet samt omvandlarnas topologier väljas omsorgsfullt. Till att börja med kan strukturen hos LED-drivdon delas in i enstegs- eller tvåstegsdrivdon. Enstegsdrivdon innebär att drivdonet endast består av en DC/DC-omvandlare som reglerar strömmen och samtidigt förbättrar effektfaktorn. Huvudsakligen består dessa LED-drivdon av en flyback-omvandlare i och med dess effektfaktorkorrigerande och dessutom isolerande egenskaper. Även buck-omvandlare kan implementeras ifall galvanisk isolering inte är ett kriterium. Enstegsdrivdon är på grund av sin enkla struktur billiga och mindre komplexa än tvåstegsomvandlare. Därtill bearbetas energin hos enstegsdrivdon bara en gång, vilket minskar förlusterna. Enstegsomvandlare är däremot känsliga för spänningsvariationer i ingångsspänningen, vilket skapar behovet för en stor kondensator för utjämnning av strömrippel. Kondensatorn är i allmänhet en stor elektrolytkondensator, vilket försämrar såväl livslängden som storleken hos drivdonet. Därmed utgör enstegsomvandlare ett billigt alternativ som lämpar sig för

lågeffektimplementering där ström kvaliteten och storleken inte prioriteras[1, 13].

Tvåstegsdrivdon består av två DC/DC-omvandlare, varav den ena utgör effektfaktorkorrigeringssteget och den andra utgör strömregleringssteget. Exempelvis kan en boost-omvandlare stå för effektfaktorkorrigeringen, medan en resonant omvandlare förser lysdioden med stadig ström. Rippel som uppstår vid effektfaktorkorrigeringssteget jämnas därmed ut i strömregleringssteget, vilket innebär att ingen stor kondensator behövs för detta ändamål. Detta förbättrar livslängden hos drivdonet och därtill uppnås en högre effektfaktor än hos enstegsdrivdon. Tvåstegsomvandlare är däremot mera komplexa än enstegsdrivdon, vilket innebär att de även är dyrare. Uppdelningen i två steg innebär dessutom att energin bearbetas två gånger, vilket orsakar större växlingsförluster. Dessa förluster kan reduceras genom att använda resonanta omvandlare som möjliggör nollspänningsväxling eller genom att integrera stegen och minska antalet växlande transistorer[1].

4 Produktanalys

I detta kapitel analyseras en utvald produkt som innehåller ett LED-drivdon. Analysen genomförs med stöd av den information som behandlats i arbetets tidigare kapitel för att ge en mera praktisk uppfattning om funktionen och implementeringen av LED-drivdon.

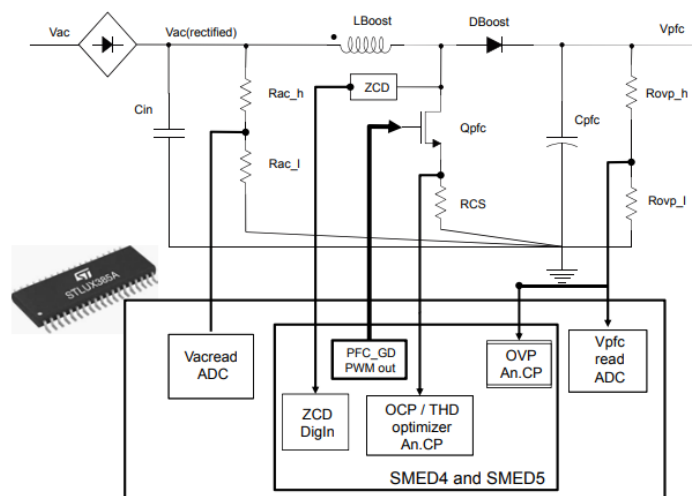
Produkten som analyseras är STEVAL-ILLO66V2 som är ett utvärderingskort ämnat för att utvärdera drift av högeffektiva LED-armaturer, exempelvis LED-strippar i gatubelysning[14]. Trots att produkten består av ett utvärderingskort och därmed inte används i färdiga produkter, fungerar den som ett bra exempel för denna analys. Analysen koncentrerar sig på utvärderingskortets effektfaktorkorrigeringssteg och LC-resonanssteg.

Utvärderingskortets drivdon utgörs av en tvåstegslösning där omvandlingen är uppdelad i två steg. Ingångsspänningen i utvärderingskortets drivdon likriktas med en likriktarbrygga följt av ett EMI-filter som skyddar spänningskällan från högfrekvent brus. Det första steget utgörs av ett effektfaktorkorrigeringssteg som är baserat på en boost-omvandlare. Det andra steget utgör strömregleringssteget och består av en resonant LC-omvandlare som försör lysdioden med reglerad ström. Såväl effektfaktorkorrigeringssteget som strömregleringssteget styrs av den integrerade styrkretsen STLUX385A. Styrkretsen erbjuder även funktioner som möjliggör dimning och trådlös styrning samt skyddsfunktioner mot överspänning.

4.1 Effektfaktorkorrigeringssteget

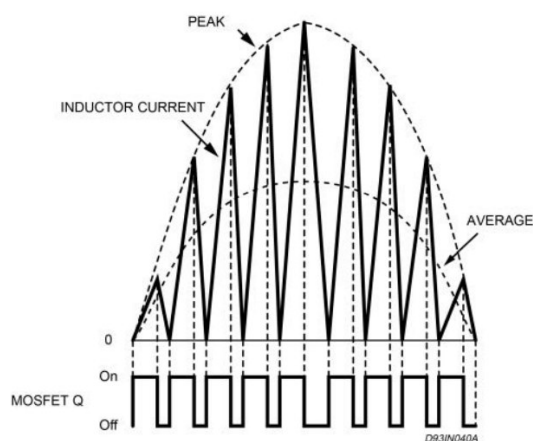
Efter likriktning och filtrering följer drivdonets effektfaktorkorrigeringssteg, vars kopplingsschema presenteras i figur 8. Omvandlaren som har implementerats för effektfaktorkorrigeringen är av boost-topologi och fungerar i BCM-läge.

Styrkretsen STLUX385A mäter den korrigerade utgångsspänningen med hjälp av en strömfördelare som i figur 8 representeras av motstånden R_{ovp_h} och R_{ovp_l} . Samma uppmätta spänning används även för överspänningsskyddet, vilket är en ytterligare funktion hos styrkretsen. Den uppmätta utgångsspänningen jämförs sedan med en referensspänning som på motsvarande sätt uppmäts med en spänningsfördelare på ingångssidan bestående av motstånden R_{ac_h} och R_{ac_l} . Utgående ifrån skillnaden mellan utgångsspänningen och referensspänningen reglerar styrkretsen arbetscykeln hos MOSFET:en Q_{pfc} med hjälp av pulsmodulering. Därigenom formges ingångsströmmen så att den hamnar i fas med ingångsspänningen.



Figur 8. Effektfaktorkorrigeringssteget i STEVAL-ILL066V2

Utöver spänningsjämförelsen som görs genom återkopplingen ingår även nollströmsdetektering i steget. Detta möjliggör att boost-omvandlaren fungerar i BCM-läge med en konstant påslagningstid. Resultatet är en triangelrformad ström genom spolen L_{Boost} , vars medelvärde utgör en sinusformad strömsignal som följer fasen hos ingångsspänningen. I figur 9 visas strömmen genom spolen samt den motsvarande medelströmmen i förhållande till cykeln hos MOSFET:en Q_{pfc} som verkar med konstant påslagningstid.



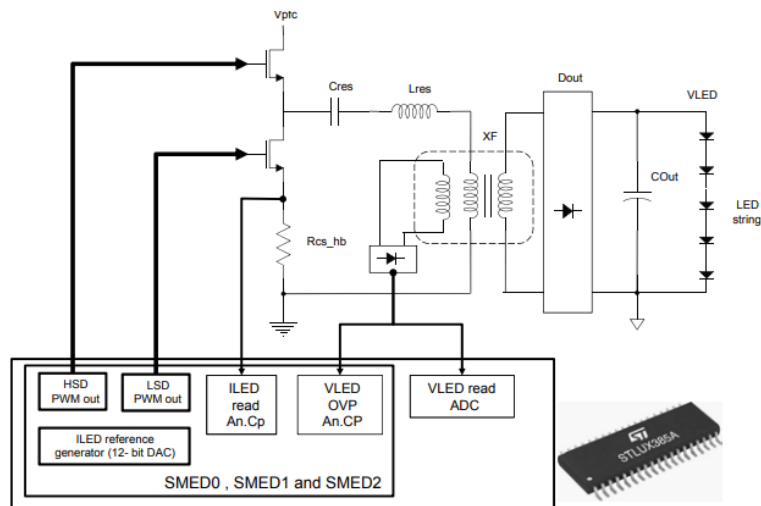
Figur 9. Strömmen genom spolen L_{Boost}

I figur 9 framkommer även den stora variationen hos strömmen i och med att omvandlaren fungerar BCM-läge. Detta innebär att en förhållandevis hög rippel förekommer i utgångsspänningen, vilket det efterföljande resontana strömregleringssteget är känsligt för. Kondensatorn C_{pfc} som är placerad i

utgången hos omvandlaren jämnar ut spänningsvariationerna i utgångsspänningen och minskar därmed rippeln.

4.2 Det resonanta strömregleringssteget

För reglering av utgångsströmmen till LED-strippen används en isolerad resonant omvandlare som styrs av styrkretsen STLUX385A. Omvandlaren är baserad på en halvbrygga bestående av två MOSFET:ar som fungerar med nollspänningsväxling samt en serie-resonanskrets. Isoleringen fungerar med en transformator som överför energin från primärsidan till sekundärsidan. En likriktarbrygga och en kondensator placerade på sekundärsidan förser lysdioden med reglerad likström. Kopplingsschemat för detta steg är presenterat i figur 10 där en LED-stripp utgör lasten.



Figur 10. Resonanta LC-steget hos STEVAL-ILLO66V2

Halvbryggan hos det resonanta strömregleringssteget är direkt kopplat till utgången hos effektfaktorkorrigeringssteget, vars utgångsspänning är V_{pfc} . Halvbryggan verkar med en arbetscykel på 50 %, vilket ger upphov till en rektangulär växelspänning över resonanskretsen. Växelfrekvensen hos halvbruggan f_{hb} anpassas efter minimumvärdet och maximumvärdet hos ingångssidan. Utgående ifrån ekvationen för omvandlarens växelfrekvens

$$f_{hb} = \frac{n}{16 \cdot I_{LED} \cdot L_{res}} \cdot \frac{V_{pfc}^2 - [2n \cdot (V_{LED} + V_{dout})]^2}{V_{pfc}} \quad (7)$$

kan resonansspolens induktans L_{res} samt resonanskondensatorns konduktans C_{res} beräknas. Frekvensen hos halvbruggan motsvarar

resonansfrekvensen hos serie-resonanskretsen bestående av kondensatorn C_{res} och spolen L_{res} . Därigenom uppstår en styckvis sinusformad ström i resonanskretsen.

För att uppnå nollspänningsväxling bör följande krav uppfyllas:

$$n \cdot (V_{LED} + V_{dout}) < \frac{V_{pfc}}{2} \quad (8)$$

där n är varvtalsförhållandet hos omvandlarens transformator XF, V_{LED} är spänningen över LED-strippen och V_{dout} är spänningen över likriktaren. Detta innebär att den reflekterade spänningen från sekundärsidan inte får överstiga hälften av ingångsspänningen i primärsidan. Ifall den reflekterade spänningen överstiger detta värde kommer MOSFET:arna att slutas innan spänningen sjunkit till noll. Därmed bör varvtalsförhållandet för transformatorn XF bestämmas enligt ekvation (7) för minimumvärdet hos ingångsspänningen V_{pfc} .

Transformatorn XF fungerar i det närmaste som en ideal transformator. Detta innebär att förhållandet mellan strömmen på primärsidan och strömmen på sekundärsidan endast beror på varvtalsförhållandet n hos transformatorn. Denna ideala egenskap förenklar kontrolleringen av sekundärströmmen genom reglering av primärströmmen. Enligt ekvationen för utgångsströmmen

$$I_{LED} \approx \frac{n}{2} \cdot I_{res, pk} \quad (9)$$

är utgångsströmmen I_{LED} beroende av transformatorns varvtalsförhållande samt resonansströmmens toppvärde $I_{res, pk}$. Styrkretsen STLUX385A används för att mäta detta toppvärde med hjälp av motståndet R_{cs_hb} som är placerat mellan den lägre MOSFET:en och jord. En hjälplindning är kopplad till transformatorn för upptäckandet av oregelbundenheter samt för mätning av den reflekterade spänningen på primärsidan.

5 Sammanfattning

Detta arbete behandlar mekanismen och uppbyggnaden hos LED-drivdon med integrerad effektfaktorkorrigerings i syfte att ge en teoretisk och praktisk uppfattning om deras funktionsprincip. Därtill analyseras LED-drivdonet i utvärderingskortet STEVAL-ILLO66V2. Lysdioders karakteristiska egenskaper kräver att dessa förses med en stadig ström för att de ska fungera effektivt utan att överhettas. För att uppnå detta utnyttjas särskilda LED-drivdon med den huvudsakliga uppgifter att förse lysdioden med stadig likström samtidigt som påfrestningen på källan beaktas.

LED-drivdon bestående av switch-mode-omvandlare utnyttjar snabbt växlande transistorer för att reglera och forma den inkommande växelspänningen efter lysdiodens behov. Regleringen sker genom uppföljning av strömmen genom lysdioden efter vilken transistorn styrs med pulsbredmodulering. LED-drivdon kan även förbättra effektfaktorn genom effektfaktorkorrigerings. Detta innebär att den harmoniska distorsion som orsakas av de aktiva komponenterna i drivdonet korrigeras för att minska belastningen på spänningskällan. Effektfaktorkorrigeringssteget i utvärderingskortet STEVAL-ILLO66V2 består av en boost-omvandlare som verkar i BCM-läge.

Utefter behov utnyttjas olika typer av LED-drivdon som skiljer sig från varandra vad gäller deras struktur och funktion. Switch-mode-omvandlare av olika topologier implementeras för att ge drivdonet egenskaper som lämpar sig för ändamålet. Icke-isolerade omvandlare är enkla och kostnadseffektiva alternativ som lämpar sig för lågeffektimplementering. Isolerade omvandlare utnyttjar energiöverföring med induktion för att isolera och skydda lysdioden. Isolerade omvandlare är i allmänhet komplexa och dyra men de kan å andra sidan uppnå en hög prestanda och effektivitet. Det integrerade drivdonet i utvärderingskortet STEVAL-ILLO66V2 utnyttjar en resonant omvandlare för strömregleringen. Denna typ av omvandlare är baserade på en resonanskrets som är anpassade för att nollspänningsväxling ska uppnås i dess MOSFET-transistorer.

Vid konstruktionen av LED-drivdon beaktas utöver dess slutliga syfte även bland annat dess livslängd, kostnad, storlek och effektivitet. Utformningen av ett drivdon omfattar anpassning av omvandlartransistorernas växelfrekvens, dimensionering av ingående komponenter samt val av lämplig omvandlartopologi. Mellan dessa faktorer krävs väl avvägda kompromisser för att åstadkomma en så ändamålsenlig och effektiv lösning som möjligt.

Sammanfattningsvis ger arbetet en helhetsbild av funktionsprincipen hos LED-drivdon samt redogör för effektfaktorkorrigerings verkan. Därigenom utreds deras betydelse vad gäller hög energieffektivitet och elkvalitet.

Källhänvisningar

- [1] Y. Wang, J. M. Alonso, and X. Ruan, "A Review of LED Drivers and Related Technologies," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, nr. 7, ss. 5754–5765, 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2677335.
- [2] S. a. Winder, *Power supplies for LED driving*. Cambridge, Massachusetts ; London, England :: Elsevier, 2017, ss. 1–305.
- [3] S. Cangeloso and B. Jepson, *LED lighting*, First edition. ed. (LED lighting : a primer to lighting the future). Beijing: O'Reilly, 2012.
- [4] L. Yu and J. Yang, "The topologies of white LED lamps' power drivers," in *2009 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, 20–22 May 2009 2009, ss. 1–6.
- [5] H. v. d. Broeck, G. Sauerlander, and M. Wendt, "Power driver topologies and control schemes for LEDs," in *APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 25 Feb.–1 March 2007 2007, ss. 1319–1325, doi: 10.1109/APEX.2007.357686.
- [6] M. Esteki, S. A. Khajehoddin, A. Safaee, and Y. Li, "LED Systems Applications and LED Driver Topologies: A Review," *IEEE Access*, vol. 11, ss. 38324–38358, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3267673.
- [7] S. Maniktala, *Switching power supplies A-Z*, 2nd ed. (Switching poer supplies A to Z). Oxford: Newnes, 2012.
- [8] B. M. Eker, Y. Çetinceviz, and E. Şehirli, "LLC Resonant Converter Based Led Driver Fed by Single Phase High Power Factor Boost Converter," in *2023 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE)*, 17–20 Dec. 2023 2023, ss. 1–5, doi: 10.1109/PESGRE58662.2023.10404127.
- [9] "J. Kyyrä, "Zero-Voltage or Zero-Current Switchings," föreläsning 9, ELEC-E8417 – Switched-Mode Power Supplies, Höskolan för Elektroteknik, Aalto-universitetet, Espoo, Finland, 2021.."
- [10] "J. Kyyrä, "Power factor correction," föreläsning 18, ELEC-E8417 – Switched-Mode Power Supplies, Höskolan för Elektroteknik, Aalto-universitetet, Espoo, Finland, 2021."
- [11] T. N. Gücin, B. Fincan, and M. Biberöglü, "A Series Resonant Converter-Based Multichannel LED Driver With Inherent Current Balancing and Dimming Capability," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, nr. 3, ss. 2693–2703, 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2838261.
- [12] Y. Wang, Y. Guan, K. Ren, W. Wang, and D. Xu, "A Single-Stage LED Driver Based on BCM Boost Circuit and \$LLC\$ Converter for Street Lighting System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, nr. 9, ss. 5446–5457, 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2416341.
- [13] D. Camponogara, G. F. Ferreira, A. Campos, M. A. D. Costa, and J. Garcia, "Offline LED Driver for Street Lighting With an Optimized Cascade Structure," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, nr. 6, ss. 2437–2443, 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2263631.

- [14] "F. Ferrazza och A. D'Adda, 100 W LED Street Lighting Application Using STLUX385A, Application Note AN4461 Rev. 4, STMicroelectronics, Mars 2018. [Online]. Tillgänglig: https://www.st.com/resource/en/application_note/an4461-100-w-led-street-lighting-application-using-stlux385a-stmicroelectronics.pdf."