

Lækstrømme i installationen

Beskyttelse mod uønsket udkobling

Juni 2020



Opgavens indhold beskriver og viser problematikken med lækstrømme i de faste installationer.

Opgaven har især fokus på boliginstallationer, men indeholder også problematikker der opstår i industrien blandt andet fra frekvensomformere, invertere og belysning.

Opgaven behandler standarden 60364 og de krav der stilles til lækstrømme, hvor der samtidig gives et bud på, hvordan lækstrømme bør projekteres og dimensioneres.

Indhold

1.	Indledning.....	3
2.	Problemstilling.....	3
3.	Problemformulering og afgrænsning	4
4.	Empiri, litteratur og metodevalg	5
5.	Lækstrømme.....	6
5.1.	Definitionen af lækstrømme	6
5.2.	Lækstrømme i den faste installation	7
5.3.	Lækstrømme fra apparater	9
5.3.1.	Lækstrømme med DC-indhold.....	10
5.3.2.	Lækstrømme fra frekvensomformere	11
5.3.3.	Højfrekvente lækstrømme	13
5.3.4.	konstante og peak lækstrømme.....	14
5.4.	Delkonklusion	16
6.	Kondensator teori DC	17
6.1.	Kondensatorstørrelsen	17
6.2.	Opladning og afladning af kondensatoren	20
6.3.	Kondensator teori AC	23
6.4.	Delkonklusion	24
7.	Fejlstrømsbeskyttelse ved lækstrømme.....	25
7.1.	Krav mod uønsket udkobling af fejlstrømsafbryder.....	25
7.2.	Generelt om fejlstrømsafbryderen.....	25
7.3.	Fejlstrømsafbryder typer.....	26
7.3.1.	Type A.....	26
7.3.2.	Type B	27
7.4.	Immunitets teknologier	27
7.5.	Lægstrømme i beskyttelsesjordingslederen.....	29
7.6.	Delkonklusion	30
8.	Konklusion	31
9.	Perspektivering.....	32
10.	Bibliografi.....	33
11.	Bilag 1 - Apparater og lækstrømme.....	34

1. Indledning

Lækstrømme er defineret ved at en elektrisk strøm der løber i en uønsket ledende vej under normale driftsforhold. Problematikken med lækstrømme er at når den resulterende lækstrøm er stor nok, så risikerer vi en uønsket udkobling på vores fejlstrømsafbryder, eller i værste tilfælde ingen udkobling. Dette har betydning for drift og personsikkerhed.

Jeg vil i opgaven vise hvilke typer af lækstrømme en elektrisk installation, og især fejlstrømsrelæet bliver udsat for, hvilket har stor betydning for valg af beskyttelsesudstyr. Ligeledes vil akkumuleringen af lækstrømmens størrelse have betydning, og jeg vil her vise hvad der gør sig gældende for lækstrømmens størrelse.

Modsat rene lineære belastninger, som glødepærer og varmelegemer, vil der i stigende grad komme ikke-lineære belastninger, da vi tilslutter flere og flere komponenter/apparater med indbygget elektronik til vores faste elektriske installationer. I den anledning vil jeg vise hvilke komponenter der påvirker belastningskurven.

Ved en forundersøgelse har jeg fundet ud af at lækstrømme løber ad en uhensigtsmæssig ledende vej tilbage til forsyningspunktet, grundet fysiske- og "parasit" kapacitanser i kabler. Hertil vil jeg rent teknisk forklare teorien ved kondensatoren, for at synliggøre sammenhængen med strømmens størrelse og tilstedeværelse.

2. Problemstilling

Problematikken med lækstrømme er at vi i stigende grad, får flere af dem i de elektriske installationer. I den forbindelse vil det være interessant at undersøge hvilke komponenter eller apparater der danner lækstrømme, for at finde ud af om det har betydning for eventuelle boliginstallationer, eller installationer i industrien, hvor meget LED belysning bliver installeret.

I forbindelse med automatisk afbrydelse af den elektriske installation ved hjælp af fejlstrømsafbryder, vil en stigende tendens af lækstrømme kunne være skyld i utilsigtede udkoblinger, eller slet ingen udkobling. Her er det vigtigt at man får installeret den rigtige type af fejlstrømsafbryder, eller lavet det rigtige design af den faste installation, samt tilsluttet forbrug for at opfylde dette. Det vil kunne have betydning for driften af installationen, hvor det kunne medføre økonomiske tab, men ikke mindst at kunne forårsage en brand eller være skyld i personskade.

I et fremtidsperspektiv hvor vi i stigende grad vil se elbiler i indkørslen, i kombination med varmepumper, solceller/husstandsmøller, og desuden kan man nævne husets computere, udskiftning til LED lyskilder og

andet eksisterende elektronik. Dette vil vi måske se en tendens til læk strømme i sådan en størrelse at vi oftere vil støde på problemstillingen med utilsigtet eller ingen udkobling ved en given fejl.

3. Problemformulering og afgrænsning

Ved at afgrænse problemstillingen til små problemstillinger opnås der et overskueligt overblik over rapportens indhold, og dermed grundlag for de endelige problemformuleringer. I rapporten vil der blive beskrevet, analyseret og vurderet følgende problemformuleringer:

For at forstå hvordan lækstrømme opstår, er vi nødsaget til at undersøge kablernes "parasit kapacitans" og hvilke apparater der danner lækstrømme. Ligeledes er det vigtigt at vi ved hvilken blanding af jævnstrøm og vekselstrøm der løber i installationen og dermed undersøge hvilke komponenter der er inde i apparaterne. Dette har derfor ledt til følgende problemformuleringer:

- **"Hvilke typer af lækstrømme løber i installationen, og hvad har det af betydning for valg af beskyttelsesudstyr?"**
- **"Hvordan finder lækstrømmen vej gennem kabler og apparater til jord?"**

Da kondensatoren er skyld i at der løber en strøm til jord, vil det være spændende at undersøge teorien om kondensatoren, for at synliggøre hvad der påvirker strømmens størrelse. Dette har derfor ledt til følgende problemformulering:

- **"Hvilke egenskaber gør sig gældende for strømmens størrelse ved en given kondensator?"**

Da lækstrømme kan opstå i de elektriske installationer, vil det være interessant at undersøge hvad de gældende standarder skriver om lækstrømme. Dette har derfor ledt til følgende problemformulering:

- **"Hvorledes beskriver gældende standarder omkring krav og beskyttelse mod lækstrømme i de elektriske installationer?"**

4. Empiri, litteratur og metodevalg

Jeg har i opgaven brugt både primære og sekundære datakilder til at besvare opgavens problemformuleringer.

Jeg er under min opgaveskrivning faldet over flere datablade der estimerer lækstrømme fra forskellige apparater og fast installation uden synderlig forklaring og belæg bagved. Dette har ført mig til at synliggøre lækstrømmens størrelse i kabler, i det samlede antal meter i installationen. Her har jeg udført en testmåling med en lækagetangamperemeter, for at fastslå den specifikke værdi, for at sammenligne med de estimerede værdier i databladene.

Til at besvare de stillede problemformuleringer i opgaven, har jeg brugt Datablade fra ABB. (2015). *Technical guide*, Gerin, Merlin. (2007). *Beskyttelse mod uønsket udkobling og transienter*, industries, Eaton. (2017). *Residual Current Devices* og Schneider Electric . (2018). *Electrical installation guide* til at besvare lækstrømmens størrelse, oprindelse, forskelligartede lækstrømme der forvolder forskellige problemstillinger, samt fejlstrømsafbrydertechnologi der er bedre egnet mod uønsket udkobling. Ligeledes har jeg brugt Bonde, T. (2018). *Elektroteknik 8 til at beskrive om de forskellige fejlstrømsafbrydertyper*.

Til at forstå hvorfor de forskelligartede lækstrømme opstår, har jeg brugt "Evans, P. (18/05. Maj 2020). Hentet fra the engineering mindset: <https://theengineeringmindset.com/>" til at beskrive komponenterne i apparaterne. Til at definere strømmens størrelse ved en kondensator har jeg brugt "Lauritsen, F. (2016). *Grundlæggende elektroteknik*" og "nkt.dk. (2017). *Teknisk katalog*" for sammenligning med kabler. Til at belyse de gældende bestemmelser for lækstrømme i installationen, har jeg brugt DS/HD 60364 (2019) standardsamlingen til installationsbekendtgørelsen.

5. Lækstrømme

Følgende afsnit omhandler lækstrømme i en given lavvoltinstallation og hvordan de opstår. Afsnittet omhandler lækstrømme der dannes forskellige steder i installationen, som har forskellige indvirkninger på installationens beskyttelsesudstyr, i form af uønsket udkobling eller slet ingen udkobling ved en given fejl. Vi kommer til at se lækstrømme i den faste installation forårsaget af kabler, men også fra apparater tilsluttet. Ved lækstrømme fra kabler sammenligner jeg størrelsen fra estimerer fra datablade med målingsforsøg.

Lækstrømme gennem tilsluttet elektronik vil trække en ikke-lineær strøm, og i den forbindelse kommer vi ind på hvorfor sinuskurven for strømmen bliver ikke-lineære, og dermed en udfordring for typisk beskyttelsesudstyr installeret. Hertil kommer vi ind på frekvensomformerens påvirkning af sinuskurven, og påvirkninger fra højfrekvente lækstrømme.

5.1. Definitionen af lækstrømme

Ifølge DS/HD 60364 defineres en lækstrøm som en elektrisk strøm i en uønsket ledende vej under normale driftsforhold.¹

I den faste installation vil der forekomme vedvarende lækstrømme under normal drift, enten fra den faste installation i kablerne, eller fra apparater som er koblet til den faste installation. Under normal drift, vil vi have små transiente ind- og udkoblinger af blandt andet LED-drivere, hvor der kan forekomme peak lækstrømme, som vi kommer ind på senere.

Lækstrømmene kan opstå i kabler i den faste installation og det vi kobler dertil, hvilket bevirker at vi kan få alt fra konstante 50 Hz AC lækstrømme til pulserende DC eller rene DC lækstrømme, men også højfrekvente lækstrømme, som alle i en negativ retning kan få fejlstrømsrelæet til at miste sit hensigtsmæssige virke.² Det er netop derfor vigtigt at få valgt den rigtige RCD til den specifikke installation.

Lækstrømmenes størrelse afhænger blandt andet af den kvalitet kabler og apparater har, i form af design og isoleringseffekt, men også alder og de udefrakommende påvirkninger i form af fugt og varme.³

Lækstrømme opstår grundet en kapacitive virkning, og i den anledning giver det mening at nærstudere rent elektroteknisk, hvordan en kondensator virker. Inden vi kigger på det vil vi dog først og fremmest se nærmere på hvor i installationen der løber lækstrømme, samt hvilke apparater der danner lækstrømme.

¹ DS/HD 60364 Bind 1&2 - 4. udgave - IEC 60364-4-41

Side 68

² Merlin Gerin - Driftssikkerhed & følsomme installationer - Katalog 2007/08 (Danmark)

Side 7

³ Eaton Residual Current Devices - Application guide - 9.2 Constant leaking current

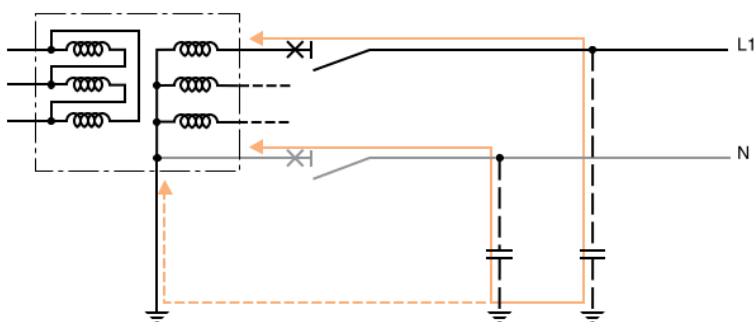
Side 31

Hertil vil vi komme ind på de forskellige sinusformede lækstrømme, da det har stor betydning for valg af beskyttelsesudstyr.

5.2. Lækstrømme i den faste installation

I den faste installation vil man i praksis have en vedvarende lækstrøm som ikke vender tilbage til sit forsyningspunkt. Dette skyldes at man har en kapacitive forbindelse fra de strømførende ledere til jord, hvilket omtales som en parasitkapacitans.

(På figur 1 ses lækstrømme der løber fra de strømførende ledere til jord gennem parasitkapacitansen, som her er vist med stiplede linjer).



Figur 1 - Driftssikkerhed & følsomme installationer - Katalog 2007/08 (Danmark) Kabelkapacitans side 8

Lækstrømme er fordelt over hele installationen, og generelt kan man sige at kapacitetsniveauet er 150 pF/m. Det vil altså sige at desto flere meter kabel, desto større vil akkumuleringen af lækstrømmene blive.⁴ I mangel på mere præcise data, så skriver Schneider Electric i "Electrical installation guide 2018" at ved en måling på 230V 50 Hz er lækstrømmen estimeret til 1,5mA/100m.⁵

Ved beregning kan vi med kapacitetsniveauet ud fra de estimerede 150pF/m, udregne kondensatorens capacitive reaktans for 100 meter kabel med følgende formel:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot l} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 150 \cdot 10^{-12} \cdot 100} \approx 212206,6 \Omega$$

Ved udregning af lækstrømmen kan vi bruge følgende formel:

$$I = \frac{U_C}{X_C} = \frac{230}{212206,6} \approx 0,0010838 A \rightarrow 1,084 mA^6$$

⁴ Merlin Gerin - Driftssikkerhed & følsomme installationer - Katalog 2007/08 (Danmark)

Side 8

⁵ Schneider Electric - Electrical installation guide 2018 - Main electrical disturbance types

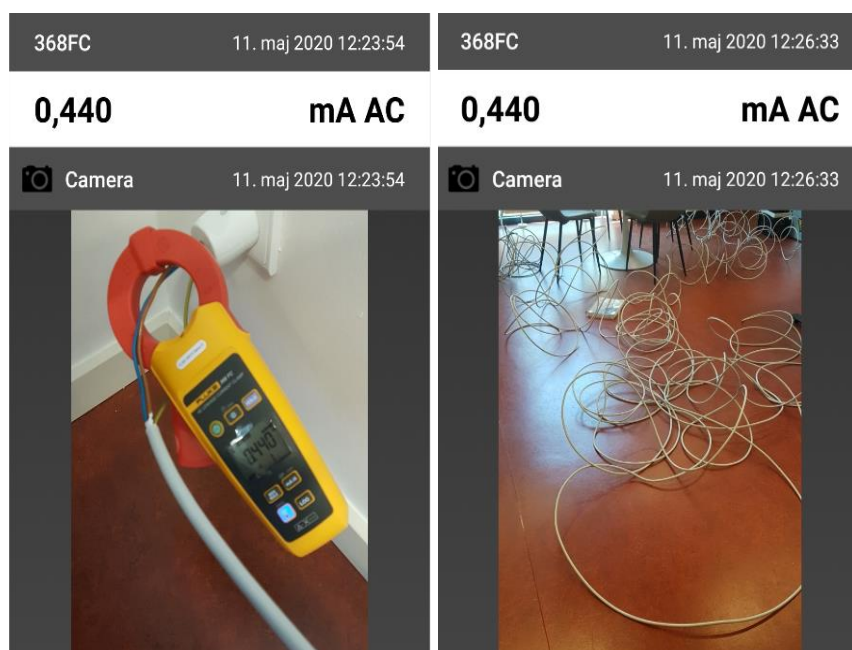
Side F36

⁶ Grundlæggende elektroteknik - 4.2.1 Den capacitive reaktans

Side 127

Resultatet viser at for hver 100 meter installationskabel, vil der være 1,084mA lækstrøm ud fra det estimerede kapacitetsniveau.

Ud fra ovenstående estimeringer og udregninger, tyder det på at der ikke ligger en dybere undersøgelse bag, da det udregnede eksempel er lavere end det estimerede 1,5mA/100m. I mangel på mere data omkring kabeltype, ledertværsnit, antal ledere, skærmet eller uskærmet kabel, har jeg undersøgt lækstrømmen for 3G2,5mm² installationskabel med en længde på 100 meter. Kablet er muffet af i enden, hvor der i stikproppen er ført løse ledninger til. Figur 2 viser testforsøget, hvor jeg måler omkring faseleder og nulleleder, og dermed måler differencen af strømmen der løber til og fra i ledningerne.



Figur 2 Strømmåling med Fluke 368

Resultatet viser 0,44mA lækstrøm for 100 meter kabel, hvilket tyder på at de estimerede værdier er høj sat for installationskablet 3G2,5mm². Ligeledes målte jeg omkring jordlederen, og fik samme resultat, så i dette testforsøg løb hele lækstrømmen tilbage til forsyningens nulpunkt i jordlederen.

En anden faktor er at akkumuleringen af lækstrømme ved 3-fasede installationer, vil stige ved asymmetrisk belastning. Ligeledes gælder det for enfasede installationer, at hvis flest tilkoblede apparater eller længder kabler er belastet hovedsagligt den ene fase til nul, så vil akkumuleringen af lækstrømmene i beskyttelseslederen være størst. Det skyldes at den vektorielle sum af lækstrømme, i samme beskyttelsesleder fra de 3 faser, er den reelle størrelse.⁷

⁷ Merlin Gerin - Driftssikkerhed & følsomme installationer - Katalog 2007/08 (Danmark)

5.3. Lækstrømme fra apparater

Lækstrømme der opstår ved brugen af nogen apparater, kan forårsage uhensigtsmæssig udkobling, eller mætning af sumstrømstransformeren i fejlstrømsafbryderen, fordi belastningen ikke er lineær. Nedenfor er listet eksempler på typiske apparater der tilkobles den faste installation.

Tabel 1 Lækstrømme og apparater

Konstante 50 Hz lækstrømme:	Pulserende og rene DC lækstrømme	Højfrekvente lækstrømme
- Standard lysstofrør m/u elektronisk spole - Husholdningsapparater - Varmeovne - HI-FI-udstyr - Filter	- Frekvensomformere - Styresystemer - Strømforsyninger - LED belysning	- Lysstofrør m/u elektronisk spole - Computere - Hastighedsregulering - Konverter

Tidligere har vi set på lækstrømme i den faste installation, og ligeledes vil lækstrømme fra apparater med konstante 50 Hz frekvens kunne udkoble fejlstrømsrelæet uhensigtsmæssigt. Så snart vi får ensrettede strømme i vores installation, hvor strømmen løber gennem fejlstrømsrelæets sumstrømstransformer, så vil der dog være en risiko for mætning af transformeren. Dette bevirker at der ingen udkobling vil forekomme ved en given fejl i installationen. Med andre ord, så vil personer kunne være i fare for en eventuel fejlstrøm gennem kroppen.

Nedenfor ses typer af lækstrømme som påvirker fejlstrømsrelæet, og hvorvidt de forårsager uønsket udkobling eller mætning af sumstrømstransformeren i fejlstrømsrelæet. Dette afhænger selvfølgelig af valg af fejlstrømsafbryder, hvilket vi kommer nærmere ind på i afsnittet om fejlstrømsafbrydere.

Tabel 2 Egen tilvirkning - Driftssikkerhed & følsomme installationer - Katalog 2007/08 (Danmark) side 7

Forstyrrelse	Uønsket udkobling	Mætning (Ingen udkobling)
50 Hz vedvarende lækstrøm	■	
Lækstrømme med DC-indhold	■	■
Højfrekvente lækstrømme	■	■

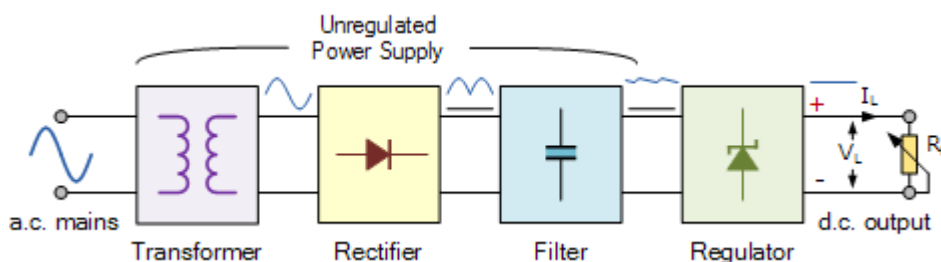
Som det ses i tabellen, er det kun ved vedvarende 50 Hz lækstrømme, vi kan risikere uønsket udkobling af fejlstrømsrelæet, så snart vi får højfrekvente og DC-indholdene lækstrømme. Dermed har vi udover risikoen for uønsket udkobling, også risikoen for at mætte sumstrømstransformeren i fejlstrømsrelæet.⁸

⁸ Driftssikkerhed & følsomme installationer - Katalog 2007/08 (Danmark)

Dette giver anledning til at nærstudere den elektronik vi tilkobler den faste installation, for at undersøge hvorfor vi i nogen tilfælde vil få en uønsket udkobling, og i andre tilfælde ingen.

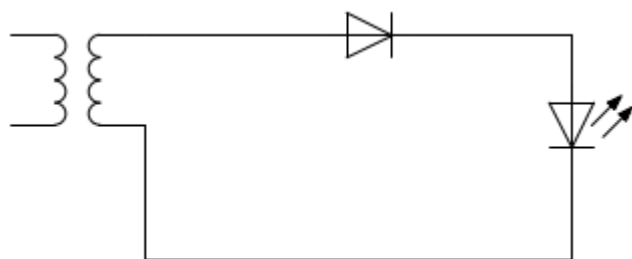
5.3.1. Lækstrømme med DC-indhold

Følgende forklaring er en forsimplet udgave af de komplekse opbygninger af print, vi finder i de forskellige apparater og led lyskilder. Dette giver et godt overblik over hvordan sinuskurven ændres ved tilslutning af forskellig elektronik. Nedenfor ses en typisk jævnstrømsforsyning tilsluttet en vekselstrømsforsyning.

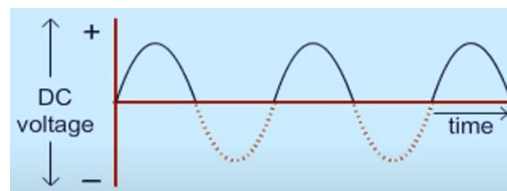


Figur 3 - <https://www.electronics-tutorials.ws/power/switch-mode-power-supply.html> 18-05-2020

Da vores forsyning er vekslende strøm, også kaldet AC, og elektronikken behøver jævnstrøm for at fungere, så er vi først og fremmest nødsaget til at få ensrettet strømmen i kredsen. Dette kan udføres ved hjælp af en diode, som kun tillader at strømmen løber den ene vej igennem. Nedenfor ses følgende kredsskema og sinuskurven ændret før og efter diode.



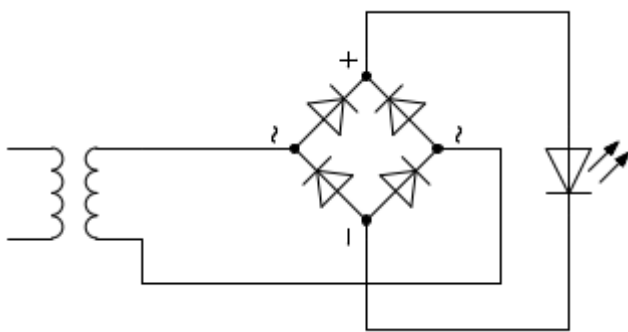
Figur 5 - PCschematic automation skoleleverison



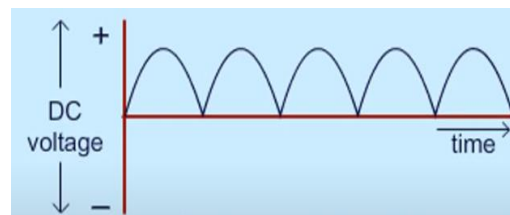
Figur 4 - <https://www.youtube.com/watch?v=IUapB2GEbh8> 19-05-2020

Det ses at ved indsættelse af dioden, at vi får det vi kalder for pulserende DC-strøm. Når sinuskurven er under nulreferencen, løber der ingen strøm i kredsen. For at udnytte den halve periode af sinuskurven, kan vi i stedet indsætte en diodebrokobling. Brokoblingen sikrer at vi i kredsen til lysdioden, får udnyttet begge halvperioder hvor strømmen stadig løber den samme vej, og ikke skiftende frem og tilbage. Nedenfor ses følgende kredsskema og sinuskurven ændret før og efter brokoblingen.⁹

⁹ <https://theengineeringmindset.com/the-basics-of-diodes-explained/>

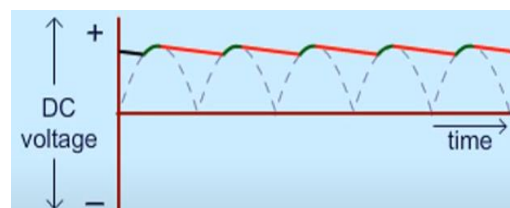
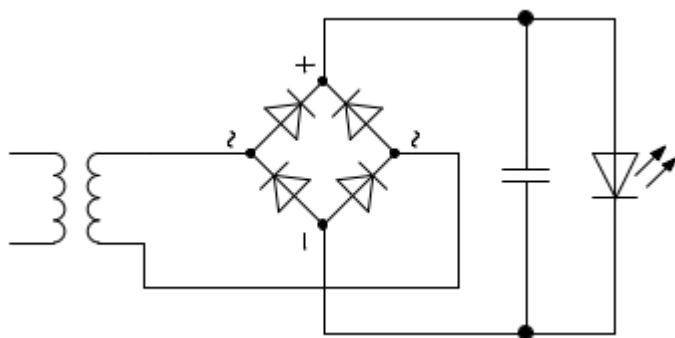


Figur 7 - PCschematic automation skoleleverison



Figur 6 - <https://www.youtube.com/watch?v=IUapB2GEbh8>
19-05-2020

Det ses at ved indsættelse af brokoblingen, har vi effektiviseret udnyttelsen af strømmængden til lysdioden, og kan dermed få et mere effektivt lys ud af det. Hvis vi indskyder en kondensator i kredsløbet, kan vi få udglattet sinuskurven betydeligt, og dermed en tilnærmelsesvis ren DC-strøm. Det fungerer på den måde at når forsyningen er oppe, så oplades kondensatoren, og når forsyningen er nede, så leverer den opladte kondensator energien til den er afladt, eller at forsyningen er oppe igen. Nedenfor ses følgende kredsskema og sinuskurven ændret før og efter kondensatoren.¹⁰



Figur 8 - <https://www.youtube.com/watch?v=IUapB2GEbh8>
19-05-2020

Figur 9 - PCschematic automation skoleleverison

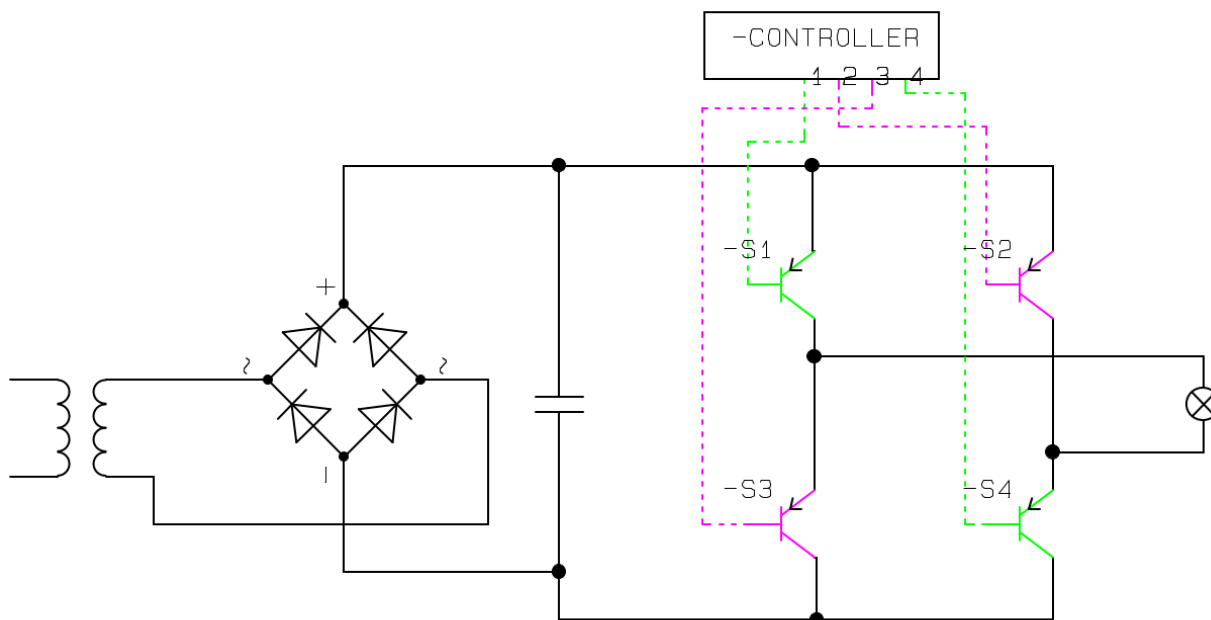
Vi har nu formået at ændre en vekslende strøm til en tilnærmelsesvis ren jævnstrøm. Den sidste udglatning kan justeres ved hjælp fra en regulator.

5.3.2. Lækstrømme fra frekvensomformere

I det foregående afsnit så vi hvordan vekselstrøm bliver til jævnstrøm. Dette er bare første led i at ændre frekvensen på vores udgående kreds fra frekvensomformerens. Det er sådan at vi skal forsøge at lave jævnstrømmen om til vekselstrøm igen, hvilket gøres gennem en inverter. I sin forenkede forklaring betyder det at vi installerer udstyr til at styre strømmens retning og hastighedsfrekvens. Dette kan gøres

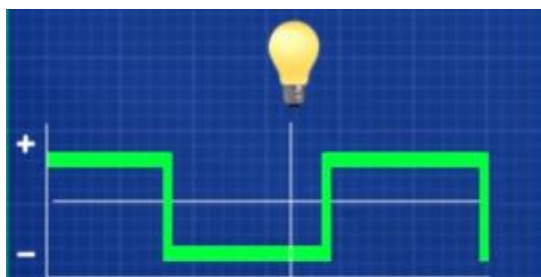
¹⁰ <https://theengineeringmindset.com/capacitors-explained/>

med ultrahurtige IGBT'er (Insulated gate bipolar transistors) som kan slutte og bryde strømkredsen. På nedenstående billede er der bygget videre på vores kreds for konvertering til jævnstrøm. Der er placeret 4 IGBT'er til at styre strømmens retning gennem den tilkoblede lyskilde.



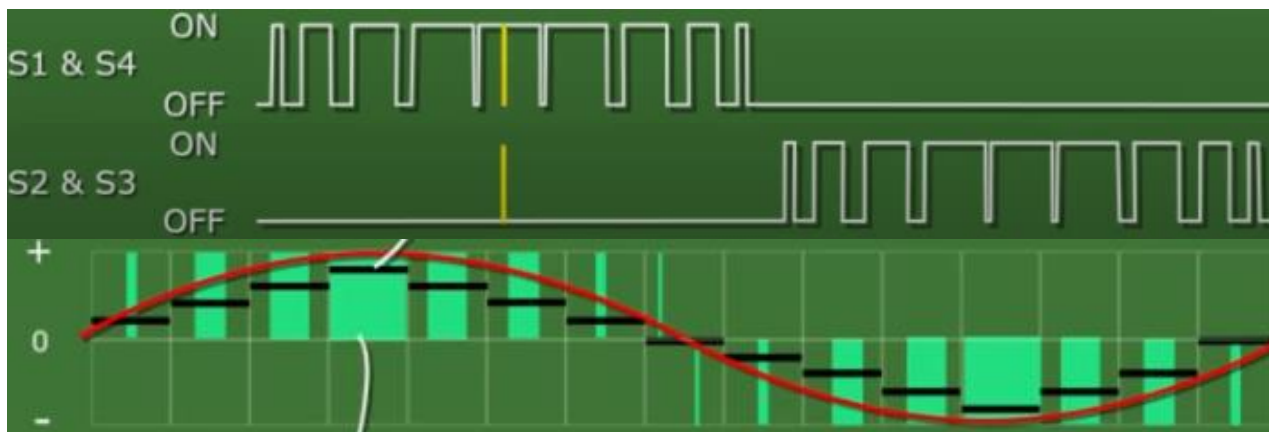
Figur 10 - PCschematic automation skoleleverison

Hvis vi forestiller os at S1 og S4 er sluttet, så vil strømmen løbe gennem lyskilden fra toppen og ned. Hvis S2 og S3 er sluttet, vil strømmen løbe gennem lyskilden fra bunden og op. Hvis vi kigger på nedenstående kurve, så ser vi at sinuskurven er firkantet, hvor første halvperiode definere strømmens retning som plus, og den anden halvperiode som minus.



Figur 11 - Egen tilvirkning <https://theengineeringmindset.com/variable-frequency-drives-explained/> 18-05-2020

Med IGBT'erne kan vi i hver sin halvperiode pulse on og off, så vi får en masse små segmenter. I hvert segment vil der løbe en strøm, hvor størrelsen er sammenhængende med segmentets åbningstid. Det ses på nedenstående billede at vi nu nærmer os den oprindelige vekslende sinuskurve.

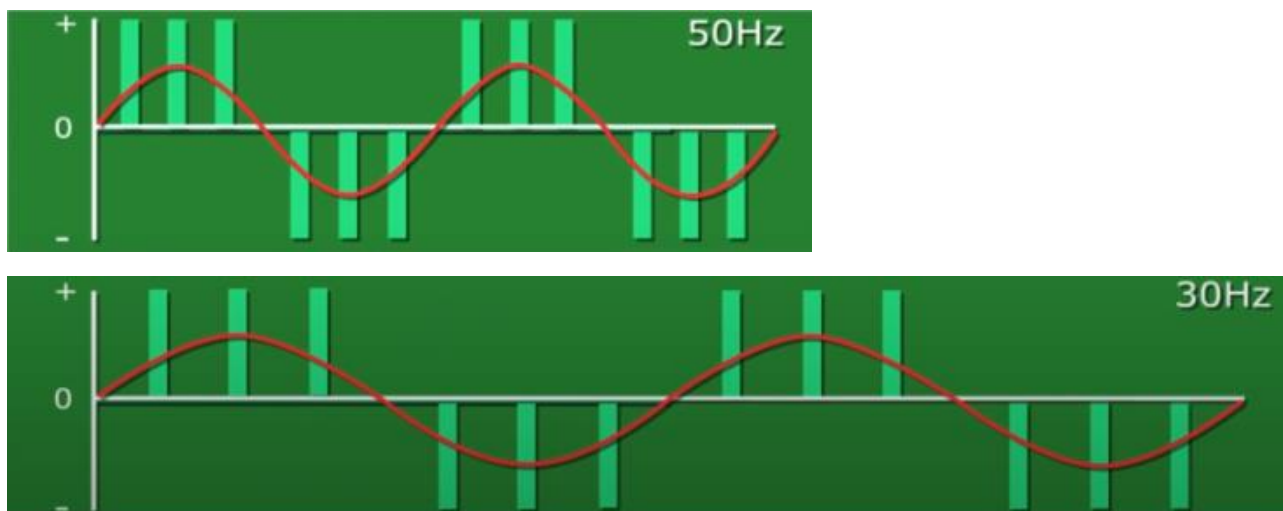


Figur 12 - Egen tilvirkning <https://theengineeringmindset.com/variable-frequency-drives-explained/> 18-05-2020

Hvis vi ønsker at ændre frekvensen, gøres det ved at ændre hastigheden, for hvornår vi pulser på S1/S4 eller S2/S3. Hvis vi ønsker en frekvens på 30 Hz, skal vi skifte mellem S1/S4 og S2/S3 hvert 0,01665s og for 50 Hz hvert 0,01s.¹¹

$$\frac{1}{30} \approx 0,0333s \quad \frac{0,0333}{2} = 0,01665s$$

$$\frac{1}{50} = 0,02s \quad \frac{0,02}{2} = 0,01s$$



Figur 13 - Egen tilvirkning <https://theengineeringmindset.com/variable-frequency-drives-explained/> 18-05-2020

5.3.3. Højfrekvente lækstrømme

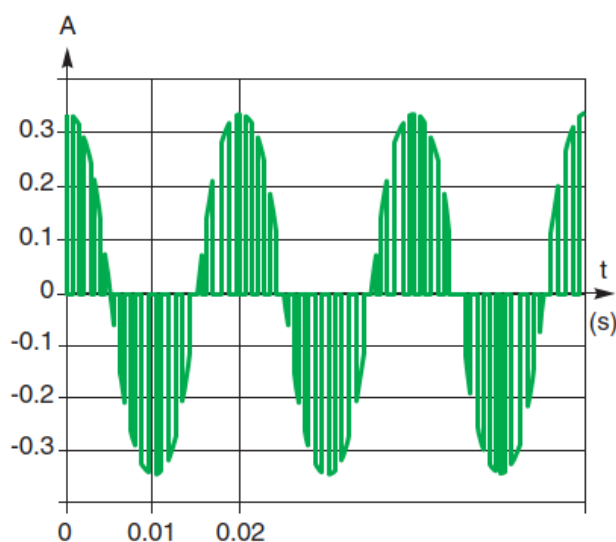
Når vi har ikke lineære belastninger, som ved frekvensomformerer, så dannes der lavfrekvente og højfrekvente harmoniske overstrømme. For at imødekomme disse elektromagnetiske forstyrrelser, kan

¹¹ <https://theengineeringmindset.com/variable-frequency-drives-explained/>

man forsyne disse med f.eks. RFI-filtre, som er forbundet direkte til jord. Filtret forøger den vedvarende lækstrøm til jord. Formålet med filtre er at overholde EU standarderne IEC 61000 for emission og immunitet, hvilket er obligatorisk for EMC-direktiverne.¹²

Frekvensomformerer generer høje niveauer af højfrekvente lækstrømme, men de er normalvis ikke farlige for mennesker, og IEC 60479 standarden fastsætter relation mellem følsomheden i menneskets legeme og frekvensen. De vigtigste frekvensniveauer der kræves beskyttelse mod er 50/60 Hz.

De høje frekvensniveauer skyldes især den svingningskurve der dannes ved brugen af IGBT-omkoblinger. Nedenfor ses et billede af en frekvensomformer der på udgangssiden danner en sinuskurve ved hjælp af IGBT-omkoblinger.¹³



Figur 14 - Schneider electric Residual current devices in LV fig. 34

Højfrekvente lækstrømme kan være fra få kHz til få MHz, og visse ledere bliver udsat for højspændingsgradienter på op mod $1\text{ kV}/\mu\text{s}$. Dette medfører at nogle frekvensomformere er skyld i at der løber op mod ti til et par hundrede mA i lederne, og disse er ikke vektorielt ligeligt belastet over faserne.

5.3.4. konstante og peak lækstrømme

I Bilag 1 finder vi estimerede værdier for lækstrømme i apparater. Akkumuleringen af lækstrømmen fra antal apparater vil kunne forårsage uønsket udkobling, og det er derfor vigtigt at designe installationen så hvert enkelt fejlstrømsrelæ ikke opnår uønsket udkobling.

Vi skal tage særlig højde for konstante lækstrømme og impulsive lækstrømme forårsaget af transienter og koblinger. Det er sådan at der ved elektronik med kondensatorer indbygget til at reducere interferens, vil

¹² Merlin Gerin - Driftsikkerhed & følsomme installationer - Katalog 2007/08 (Danmark)

Side 8

¹³ Merlin Gerin - Driftsikkerhed & følsomme installationer - Katalog 2007/08 (Danmark)

Side 16

løbe en konstant lækstrøm i kredsen, grundet kondensatoren der er forbundet direkte til jord. Mere udfordrende er at ved ind og udkobling af sådanne belastninger, vil den indledende belastning af og fra kondensatoren forårsage en strømspids der kan opnå flere ampere i op til $10\mu s$.¹⁴ Dette kan relateres til afsnittet om kondensatoren ved op- og afladning.¹⁵

Nedenfor har jeg medtaget et udklip fra en PowerPoint præsentation af Flemming Folkvardsen fra ABB. Han forklarede ved installation af en Osram driver, kunne man regne med en konstant lækstrøm og en start lækstrøm, henholdsvis 0,5mA og 2mA.

Utilsigtede RCD udkoblinger grundet LED, Elektronik og HF spoler

Lækstrømme

StepDIM signal	Input current SD(2) port	Input voltage SD(2) port (SD(2)-N)
Active (high)	$> 2.0\text{mA}_{\text{peak}}$	or $> 196\text{V}_{\text{AC}}$
Inactive (low)	$< 0.5\text{mA}_{\text{peak}}$	—

OSRAM driver

Afhængig af type kan få antal LED drivere alene få et fejlstrømsrelæ til at udkoble.




©ABB
October 4, 2019 | Slide 24

ABB

Figur 15 - ABB Flemming Folkvardsen præsentation

Flemming har opsat forudsætninger fra standarder og beregninger for at synliggøre problematikken ved uønsket udkobling, og disse kan ses nedenfor:

- Produktstandarden for RCD fastsætter tilladt udkobling ved 50% af RCD mærkeudløserstrømmen.
- DS/HD 60364 fastsætter at akkumuleringen af lækstrømmen maksimalt må være 0,3 gange RCD mærkeudløserstrømmen.

Antal led drivere ved RCD 30mA:

Konstant lækstrøm: $\frac{(24)}{0,5}$

Peak lækstrøm: $\frac{30 \cdot 50\%}{2} = 7,5\text{stk} \rightarrow 7\text{stk}$

¹⁴ Schneider Electric . (2018). *Electrical installation guide - Leakage current*

¹⁵ 6.2 Opladning og afladning af kondensatoren

Det ses ved ovenstående udregninger at der er en begrænsning på 18 led drivere, og at vi kan risikere uønsket udkobling allerede ved 7,5 led driver.¹⁶

5.4. Delkonklusion

Vi har fundet ud af at lækstrømme optræder som rene 50 Hz veksel lækstrømme og følger sinuskurven. Lækstrømme med DC-indhold kan optræde med mangeartede sinuskurveformer, da det afhænger af hvad elektronik strømmen gennemløber. Vi har fundet ud af at frekvensomformere samt reguleringskomponenter som i led belysning er skyld i højfrekvente lækstrømme, som skyldes den kobling der sker ved brugen af IGBT-komponenterne.

Ved estimeringer i datablade for fejlstrømsafbrydere, ses det at lækstrømmens størrelse er sat højt, i forhold til hvad vi måler på det kabel vi ser i afsnittet. Dette kan skyldes mangel på mere præcise data, og en generalisering af forskellige kabeltyper.

¹⁶ ABB - Flemming Folkvardsen Salgsdirektør og segmentchef hospitaler - Region Sjælland (Danmark)

6. Kondensator teori DC

For at forstå hvordan strømmen kan vandre i beskyttelseslederen og til jord, idet strømførende ledere burde være isoleret derfra, så vil jeg her vise grundlaget for lækstrømme i kabler grundet kondensatorvirkningen, og den grundlæggende teori ved en kondensator.

I den forbindelse vil jeg undersøge opbygningen og indholdet af en kondensator, for at konstatere hvilke egenskaber der påvirker størrelsen af kapacitansen, og i sidste ende strømmens størrelse.

Til sidst vil vi se på hvornår der løber en strøm, og hvad forskellen er på at tilsluttet jævnstrøm og vekselstrøm.

6.1. Kondensatorstørrelsen

Principielt består en kondensator af to lige store plader, bestående af et ledende materiale. Pladerne er placeret med en passende lille afstand som passer til deres pladeareal. Pladerne må ikke have elektrisk forbindelse, og der skal imellem dem være et isoleringsmateriale, eller isolering i form af atmosfærisk luft.

Hvis vi tilslutter en kondensator fra en elektromotors kraft, så vil elektroniske ladninger begynde at flyde til den ene plade i kondensatoren indtil den er fuldt opladet. Der dannes et elektrisk felt mellem pladerne, hvor den modsat liggende plade vil blive påvirket. Ved fuld opladning vil spændingen over kondensatoren være lig med den tilstødende spænding. Nedenfor forklares kondensatorens egenskaber ved en påtrykt DC-spænding, og grundlag for kondensator størrelsen.¹⁷

Kapacitansens størrelse defineres som ladningsmængden over spændingen, og måles i enheden Farad. Dette kan defineres som følgende:

$$C = \frac{Q}{U} [F]$$

Det er sådan at når vi har tilsluttet en kondensator til en elektromotorisk kraft, så vil spændingen over kondensatoren være lig den påtrykte spænding, når den er fuldt opladet. Med det i mente, så er det alene den ladningsmængde man kan tilføje en kondensator pr. volt, der har betydning for hvor stor kondensatorens kapacitet er.¹⁸

Der er 2 forhold der gør sig gældende for hvor meget ladning vi kan tilføje kondensatoren, og det er arealet på kondensatorens plader, og dielektricitetskonstanten. Dette er et udtryk for hvor meget elektrisk

¹⁷ Grundlæggende elektroteknik 1.2.2 Det homogene elektriske felt, kondensatorer

Side 24

¹⁸ Grundlæggende elektroteknik 1.2.3 kapacitans

Side 26

feltstyrke som den modsatte plade vil blive udsat for og måles i enheden Volt pr. meter. Dette kan defineres som følgende:

$$E = \frac{Q}{A \cdot \varepsilon} \left[\frac{V}{m} \right]$$

Forholdet mellem ladningen Q og arealet A har man valgt at betragte som en selvstændig størrelse. Det vil altså sige at jo større arealet er, desto større vil ladningen og dermed kapacitansen være.

Dielektricitetskonstanten er et udtryk for elektrisk permittivitet i et givent stof, der befinder sig mellem de 2 plader i kondensatoren. Permittiviteten er en konstant for vakuum. Multipliceres permittiviteten med stoffets materialeafhængige korrektionsfaktor, så får man den såkaldte dielektricitetskonstant. Dette kan defineres som følgende:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r^{19}$$

Hvis vi tilslutter en kondensator med en variabel pladeafstand tilsluttet en spændingskilde, så kan vi konstatere at den elektriske feltstyrke er omvendt proportional med afstanden mellem pladerne. Dette måles i volt pr. meter. Dette kan defineres som følgende:

$$E = \frac{U}{a} \left[\frac{V}{m} \right]$$

Ovenfor ses det at en øget afstand mellem kondensatorens plader, vil få den elektriske feltstyrke falde, og dermed en mindre kapacitans.

Vi kan ud fra ovenstående konstatere følgende:

$$E = \frac{U}{a} = \frac{Q}{A \cdot \varepsilon} = \left[\frac{V}{m} \right] \Rightarrow C = \frac{Q}{U} = \frac{A \cdot \varepsilon}{a} = [F]$$

Ved ovenstående kan det påvises at kapacitansen stiger hvis pladearealet eller dielektricitetskonstanten øges. Til gengæld mindskes kapacitansen hvis afstanden mellem pladerne øges.²⁰

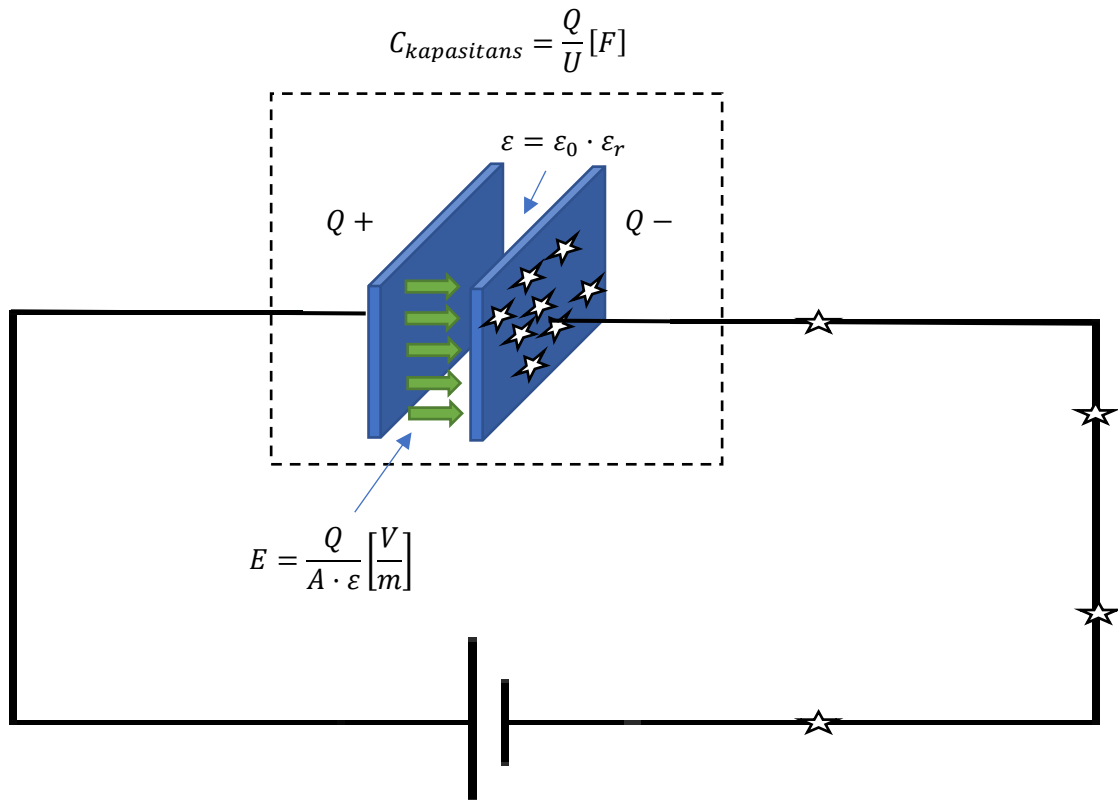
¹⁹ Grundlæggende elektroteknik 1.2.1 Det elektriske felt

Side 22

²⁰ Grundlæggende elektroteknik 1.2.3 Kapacitans

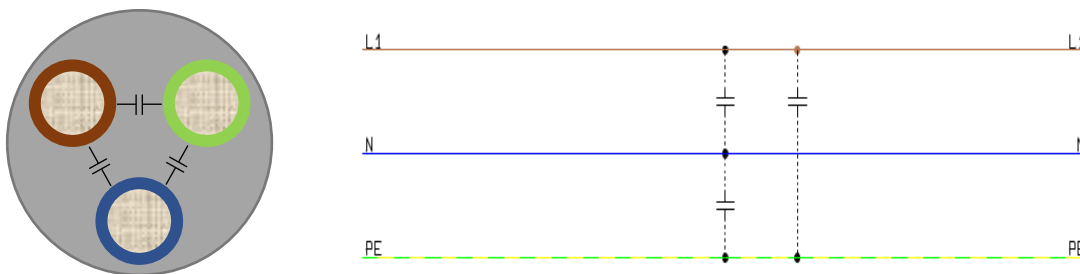
Side 26

Nedenstående billede viser princippet i en opladning af en kondensator, hvor det ses at elektronerne løber til den ene plade i kondensatoren. Elektronerne løber indtil den tilstødende kraft bliver mødt af en lige så stor modstridende kraftpåvirkning.



Figur 16 - Opladning af kondensator

Ovenstående forklaring kan tilnærmelsesvis sammenlignes med kapacitansen i installationskabler, da den afhænger af kablets design i form af lederdiameter, isolationstykkelser, afstanden mellem lederne, samt isolationsmaterialets dielektricitetskonstant.²¹ Principtegning over kapacitans i kabler se figur 16



Figur 17 - Kabelkapacitans

²¹ NKT Teknisk katalog 2017 - 7.4 kapacitans

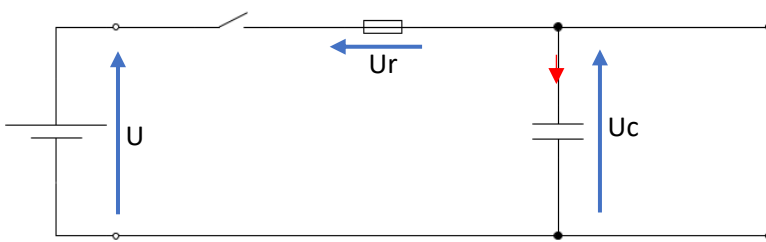
6.2. Opladning og afladning af kondensatoren

Vi har nu gennemgået kondensatorens egenskaber, som definerer størrelsen af denne. Med den baggrund, kan vi se på op- og afladning af kondensatoren, da det er her der løber en strøm.

”Den elektriske strøm er en strøm af ladede partikler, såkaldte ladningsbærere, hvis bevægelse er frembragt og eventuelt vedligeholdt af et elektrisk felt.”²²

Som beskrevet tidligere, så har vi et elektrisk felt i en opladet kondensator, men hvis kondensatoren er isoleret fra omgivelserne, vil der ingen strøm løbe. Hvis pladerne i kondensatoren midlertidigt er forbundet til ledende materiale, vil der ske en udveksling af ladningerne, som vil aflede og gøre kondensatoren elektrisk neutral. Under en afladning af kondensatoren, vil der løbe en kortvarig strøm i ledermaterialet. Ligeledes vil der under opladning løbe en kortvarig strøm.²³

Nedenfor ses et ækvivalent skema over en spændingskilde tilsluttet en kondensator, med mulighed for at slutte og bryde kredsen. Resistansen skal symbolisere modstanden i lederforbindelsen. Spændingspilene viser at kondensatoren er klar til opladning.



Figur 18 - Ækvivalentskema for opladning

Først antager vi en afladt kondensator med en brudt kreds. I det øjebliksbillede vil spændingen over kondensatoren være spændingsløs. Lige så snart vi slutter kredsen, så vil ladninger begynde at flyde til den ene kondensatorplade, og der vil begynde at løbe en strøm gennem ledningens resistans. I det øjeblik kredsen bliver sluttet, vil strømmen være højest, men i takt med at ladningerne flyder til, så falder strømmen. Det skyldes som nævnt tidligere at spændingen over kondensatoren stiger i takt med ladningen, og sammenhængende med dette, vil spændingsforskellen over resistansen falde i takt med stigningen over kondensatoren. I ovenstående eksempel kan dette forklares med følgende formel:

$$U = I \cdot r + U_c \Leftrightarrow U = U_r + U_c$$

²² Grundlæggende elektroteknik 1.3 Elektrisk strøm

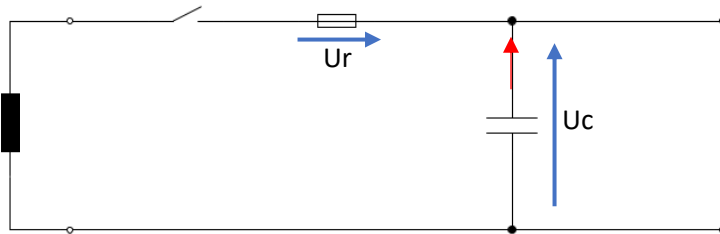
Side 33

²³ Grundlæggende elektroteknik 1.3 Elektrisk strøm

Side 33

Da resistansen er en konstant størrelse, ses det at strømmen I falder i takt med kondensatorspændingen U_c stiger da $U_r = I \cdot r$.

Hvis spændingskilden kobles fra kredsen, og den erstattes med en lus, så vil strømmen begynde at løbe fra kondensatoren og dermed udligne sig selv. Strømmen vil her blive regnet med minus som fortegn (-I).



Figur 19 - Ækvivalentskema for afladning

Modsat det der sker under opladning, så vil strømmen være høj, når spændingen over kondensatoren er høj ved afladning. Dette skyldes at kondensatoren nu agerer som spændingskilde til den er afladt. Det eneste der definerer strømmen nu, er spændingen U_c og resistansen, hvilket giver forklaringen på den modsatte virkning ved afladning. Se nedenstående formel:

$$\frac{U_c}{r} = I$$

Det ses at når spændingen falder, så falder strømmen også, da resistansen er konstant.

Ved op- og afladning har vi 2 ubekendte værdier U_c og I_c , da de er afhængige af tiden. Nedenstående ligninger gælder for op- og afladningen af kondensatoren med tilhørende strømme.

Opladning

$$U_c = U \cdot (1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)})$$

$$I_c = I \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}$$

Afladning

$$U_c = U \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}$$

$$I_c = -I \cdot e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}$$

De er løst ved matematisk omskrivning, hvilket vi ikke kommer nærmere. Jeg vil dog forklare følgende led fra ligningen, da det giver et billede af strømmens størrelse under op- og afladning:

$$e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}$$

Leddene fra ligningerne ovenfor, betyder at vi eksponentielt nærmer os værdien 0. Hvis $e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} = 0$ kan vi skrive opladningsligningen $U_c = U \cdot (1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)})$ som $U_c = U \cdot 1 - 0$, hvilket viser at spændingen over kondensatoren er fuldt opladet og dermed lig spændingskilden.

$$\tau_{(Tau)} = r \cdot C = [s]$$

Tau er en tidskonstant som måles i sekunder, og er værdien af resistansen ganget med kapacitansen. Hver gang der er gået en Tau, så har vi den samme eksponentielle opladning af kondensatoren i procent. Dette kan vises med nedenstående formler hvor der for hver Tau der er gået, er opnået en stigning på 63,21%. Dette gælder også for afladning og de tilhørende strømme.²⁴ Dette ses også på figur 19.

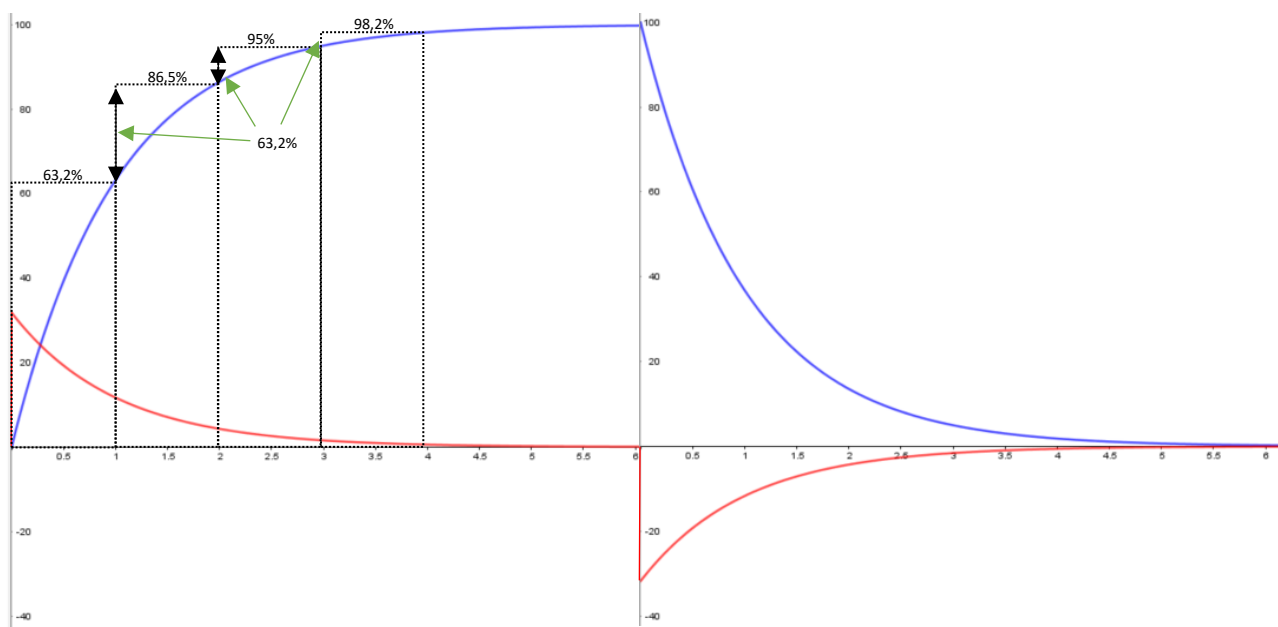
$$U_c = 100 \cdot (1 - e^{-(1)}) \approx 63,21\%$$

$$U_c = 100 \cdot (1 - e^{-(2)}) \approx 86,5\%$$

$$U_c = 100 \cdot (1 - e^{-(3)}) \approx 95\%$$

$$U_c = 100 \cdot (1 - e^{-(4)}) \approx 98,17\%$$

Nedenfor ses op- og afladningsforløbet via de blå kurver. Det ses at strømmen netop er størst i starten af opladning- og afladningsforløbet.



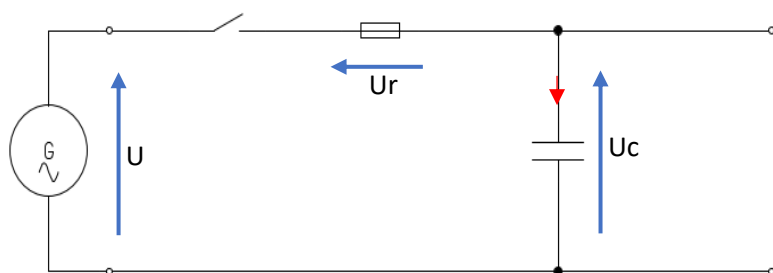
Figur 20 - strømmen ved op- og afladning

²⁴ Grundlæggende elektroteknik 3.4.1 Op- og afladning af kondensatorer

Af Y-aksen ses spændingen mellem 0 og 100 procent opladet, hvor der ud af X-aksen ses antal Tau der er gået. Strømmens størrelse er fiktiv og kun for visuel forklaring.

6.3. Kondensator teori AC

Hvis vi indsætter en vekselspændingskilde, i stedet for en jævnstrømsspændingskilde, vil der altid løbe en strøm i kredsen når den er sluttet, da kondensatoren skiftevis op- og aflader i takt med frekvensen.



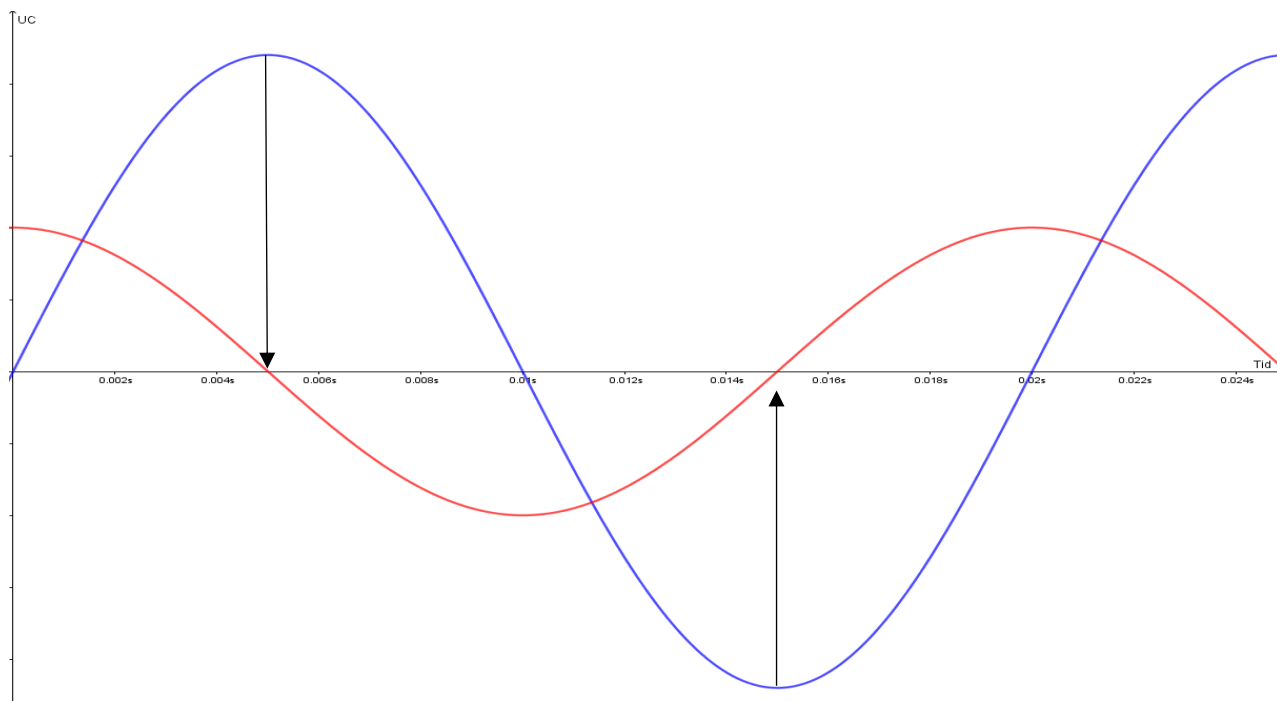
Figur 21 - Øjebliksbillede ved tilslutning af vekselspænding

Ligesom ved DC, betragtes kondensatorstørrelsen ud fra den ladningsmængde der kan tilføres kondensatoren. Kondensatorstørrelsen defineres som reaktansen (X_C), og bestemmes af kapacitansen (C) og frekvensen (f). Dette kan skrives som følgende:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Det ses ud fra formelen at reaktansen bliver mindre hvis frekvensen eller kapacitansen bliver større. Dette kan forklares med at der ved en større kapacitans, vil tage længere tid at lade kondensatoren op. Dermed opnås en mindre opladning, inden sinuskurven er i den modsatte halvperiode, hvor elektronerne vil flyde den modsatte vej. Ligeledes vil en hurtigere skiftende sinuskurve ved øget frekvens mindske ladningsmængden, da de halve sinusperioder nu bliver kortere.

Som beskrevet i kondensator teori DC, så vil strømmen under opladning være lille, når spændingen over kondensatoren er stor. Dette gælder også for AC hvor det ses på nedenstående kurve, at strømmen er forskudt 90° forud for spændingen.



Figur 22 - Strøm og spænding ved kondensator tilsluttet vekselspænding

Når spændingen er på sit højeste, ses det at strømmen er i nulgennemgangen.²⁵

6.4. Delkonklusion

Vi har i ovenstående afsnit fundet ud af at kapacitansens størrelse afhænger af afstanden og arealet mellem pladerne, samt dielektricitetskonstanten mellem pladerne. Dette kan sammenlignes med kablets design i form af lederdiameter, isolationstykkelser, afstanden mellem lederne, samt isolationsmaterialets dielektricitetskonstant.

Der løber kun en strøm ved op- og afladningsforløbet, så det vil kun være ved en pulserende eller vekslende spændingskilde vi vil se en strøm, forudsat at kondensatoren vil blive afladt når spændingen er under kondensator opladningsværdien.

²⁵ Grundlæggende elektroteknik 4.2.1 Den kapacitive reaktans

7. Fejlstrømsbeskyttelse ved lækstrømme

Følgende afsnit omhandler fejlstrømsbeskyttelse ved lækstrømme, hvor der beskrives de gældende regler, samt korrekt valg af fejlstrømsafbryder, for at undgå uønsket udkobling. Afsnittet omhandler fejlstrømsafbrydere af typen A og typen B, men særligt bliver der beskrevet fejlstrømsafbryderteologier, udviklet netop til at håndtere blandt andet lækstrømme i installationen. Afsnittet vil belyse problematikken ved akkumuleringen af lækstrømme i beskyttelsesjordingslederen.

7.1. Krav mod uønsket udkobling af fejlstrømsafbryder

For at undgå uønsket udkobling af fejlstrømsafbryderen, skal denne vælges efter at jordlækstrømme ikke kan udkoble den. Akkumuleringen af jordlækstrømme må ikke overstige 0,3 gange fejlstrømsafbryderens mærkeudløserstrøm downstream fra denne. Dette betyder at der ved en fejlstrømsafbryder på 30mA mærkeudløserstrøm, ikke er tilladt mere end 9mA lækstrømme. Allerede ved 15mA lækstrømme risikerer vi at få en uønsket udkobling.

Den elektriske installation bør overvejes hvordan den deles op, på en sådan måde at mængden af lækstrømme fordeles på installationens fejlstrømsafbrydere, og ikke forårsager en uønsket udkobling under normale drift forhold. Ligeledes bør det overvejes at benytte sig af tidsforsinket fejlstrømsafbryder forudsat at kravene i 60364-4-41 er opfyldt.²⁶

7.2. Generelt om fejlstrømsafbryderen

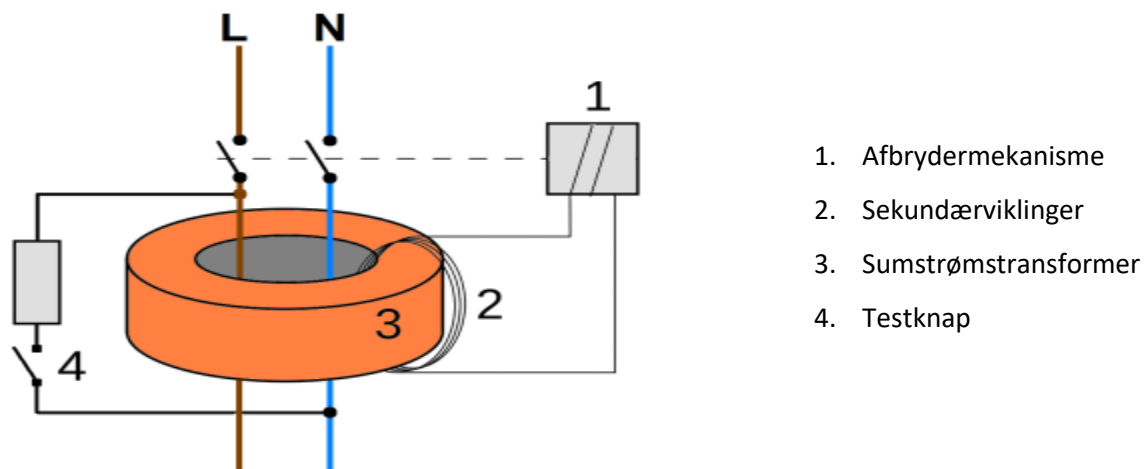
En fejlstrømsafbryder er konstrueret til at slutte, bære og bryde strømme under normale driftsforhold. Den er produceret i henhold til produktstandarden IEC/EN 61008-1. Den er konstrueret til at beskytte mennesker og dyr i tilfælde af at man kommer i kontakt med spændingsførende dele, eller udsatte ledende dele, som er blevet spændingsledende under en given fejl. Ligeledes vil fejlstrømsafbryderen beskytte effektivt mod elektrisk antændte brænde, som kan udvikles i støvede miljøer i tilfælde af isolationsfejl i kabler. Det skal siges at kun få mA lækstrømme kan forårsage en brand.

Kort fortalt består en fejlstrømsafbryder i sin enkelthed af en sumstrømstransformer, udløerspole og en afbrydermekanisme samt testfunktion.

I en fejlfri installation, vil den viktorielle strømværdi sammenlagt give værdien nul, og dermed vil der ingen spænding induceres i sekundærviklingerne til udløsermekanismen. Hvis akkumuleringen af lækstrømmene til jord derimod er for stor, og dermed den viktorielle værdi af strømmene fra lederne gennem sumstrømstransformerer er for stor, så vil der induceres en spænding i sekundærviklingen på grund af det

²⁶ DS/HD 60364 Bind 1&2 - 4. udgave - 531.3.2 Uønsket udkobling

opståede magnetfelt i jernkernen, som forårsager en udkobling af installationen downstream fra fejlstrømsafbryderen.²⁷



Figur 23 <http://www.danskelbilkomite.dk/Opladning3faser.htm> 17-05-2020

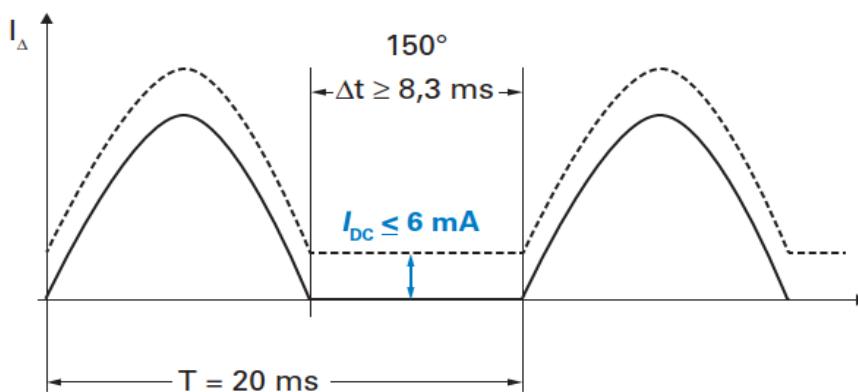
7.3. Fejlstrømsafbryder typer

Der findes forskellige typer af fejlstrømsafbrydere, hvor det er vigtigt at have estimeret tilstedeværelsen af lækstrømme, samt hvor stor en del af disse som er af anden frekvens eller DC-strømme.

Jeg vil ikke gå i dybden med alle fejlstrømsafbrydere her, men i stedet vil jeg springe direkte til problemstillingens formål, og dermed sammenligne fejlstrømsafbrydere henholdsvis type A og type B.

7.3.1. Type A

En type A bruges oftest i boliger, og kan detektere de pulserende jævnstrømme, samt op til 6mA rene DC-reststrømme i henhold til IEC/EN 61008. Se også billedet nedenfor.²⁸



Figur 24 © 2017 Eaton - Application guide fig. 24

²⁷ Elektroteknik Bog 8 7.1 RCD generelt

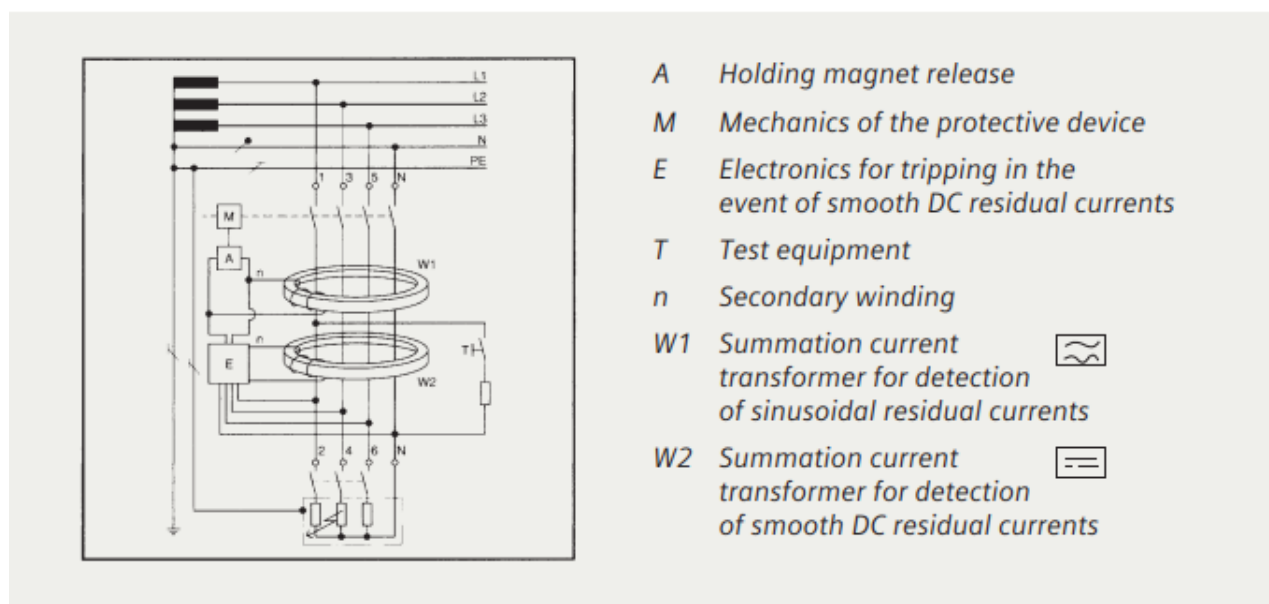
²⁸ © 2017 Eaton - Application guide - 3.8 Sensitivity to various types of residual current

Typen er velegnet når strømmen afviger fra sinusformen, og den tilsluttes elektronik bestående af enkelt ensretning uden udglatning, enfasede brokoblinger med eller uden glatning, samt hastighedsregulering og lysdæmpning. Så snart strømkredsen er af ren glat DC-strøm, vil en type A ikke være anvendelig.²⁹

7.3.2. Type B

En type B fejlstrømsafbryder er bygget til at kunne modstå fejlstrømme forårsaget af frekvensomformere og udstyr der frembringer en ren DC lækstrøm. Hvis en type A bliver udsat for en ren DC lækstrøm, kan jernkernen gå i mætning, og det er altså ikke muligt at opnå en udkobling ved en given fejlsituation. En type B er forsynet med en elektronikenhed bestående af en permanent tilsluttet vekselspænding der magnetisere spolen. På den måde kan enheden måle når den magnetiske kerne går i mætning.³⁰

Nedenfor ses et principdiagram for en type B.



Figur 25 Siemens - Residual current protective devices figure 7

7.4. Immunitets teknologier

En type A fejlstrømsafbryder ser vi i de fleste tilfælde i de elektriske installationer, og kun når fabrikanten kræver en type B, ser vi disse installeret. Typisk koster en Type B også 4-5 gange så meget alt efter fabrikant, så det vil økonomisk set kunne være forklaringen på dette.

²⁹ Elektroteknik Bog 8 7.3 - RCD type A

³⁰ © 2017 Eaton - Application guide - 3.8 Sensitivity to various types of residual current

Tendensen til et stigende antal elektronisk udstyr installeret i installationerne, vil i teorien komme nærmere grænseværdierne for udløserkarakteristikkerne for fejlstrømsafbrydere, og i forbindelse med en række "forstyrrelser" vil vi kunne opleve uønsket afbrydelse.

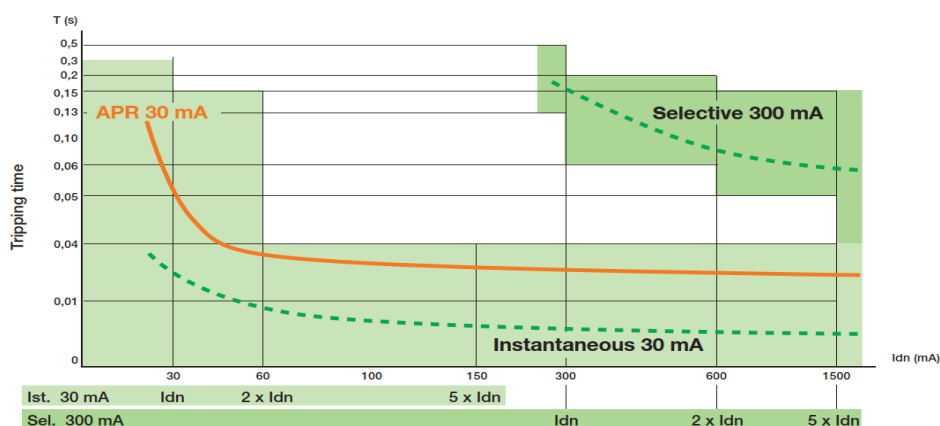
Det kan blandt andet være i forbindelse med tidligere beskrevet frekvensomformere, hvor vi ændrede frekvensen hvilket forårsagede høje niveauer af harmoniske strømme, og brugen af IGBT'er som dannede højfrekvente lækstrømme. Ligeledes vil strømme forårsaget af transienter fra elektronisk udstyr ved at slutte og bryde af kapacitive og induktive belastninger der forstærker den allerede eksisterende lækstrøm, Og overspændinger forårsaget af lyn eller omkoblinger være skyld i uønsket udkobling.

Det anbefales at dele installationen op, så hver fejlstrømsafbryder detektere en mindre lækstrøm end kravet beskrevet i DS/HD 60364.

Alternativt vil immunitets-teknologi være løsningen mod uhensigtsmæssig udkobling. Der findes flere producenter af disse, og her kan nævnes følgende:

- ABB RCD type A "AP-R anti-disturbance"
- Siemens RCCB "K super-resistant"
- Schneider electric RCD type A "SI super-immune"

Hvis vi kigger nærmere på ABB's AP-R teknologi, så finder vi ud af at det består af en lille tidsforsinkelse på udkoblingen, men den defineres ikke som en selektiv fejlstrømsafbryder. Teknologien sikrer stadig at vi har en momentan udkobling, og grænseværdierne for udkoblingstiderne og gældende standarder, vil stadig være opfyldt. Nedenfor ses udkoblingskurven for henholdsvis en almindelig type RCD, med AP-R teknologi og en selektiv version.³¹

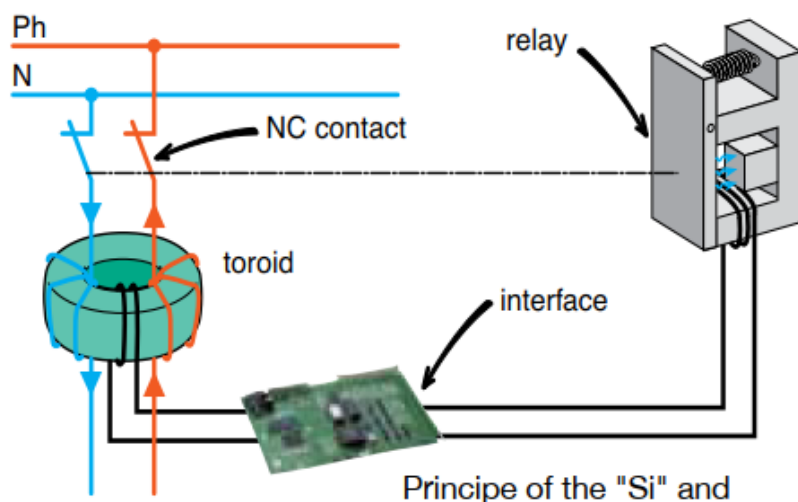


Figur 26 - ABB Technical guide - ABB RCDs with special version

³¹ ABB Technical guide - ABB RCDs with special version

Det ses at med AP-R teknologien har vi den momentane udkobling med en tid der ikke overstiger 130ms ved en udløserstrøm fra omkring 25mA. Det lysegrønne område hvor type A og AP-R fejlstrømsafbryderen ligger indenfor, viser at produktstandardens grænseværdier for udkobling.

Ligesom ved AP-R teknologien, har Schneider Electric deres SI-udgave, og på nedstående billede ses principtegningen for fejlstrømsafbryderen.



Figur 27 - Merlin Gerin - Driftssikkerhed & følsomme installationer - Katalog 2007/08 (Danmark) Side 13

Der er indbygget et elektronisk filter, som kan modstå væsentlig større transienter forårsaget af lyn og omkoblinger, men også ind- og udkobling af store kapacitans-niveauer fra lange kabelstrækninger og apparater. Et særligt EMC-mæssigt design af filteret sikrer en betydelig reducere i forhold til at mætte sumstrømstransformerer, da den ikke udsættes for de højfrekvente lækstrømme.³²

7.5. Lægstrømme i beskyttelsesjordingslederen

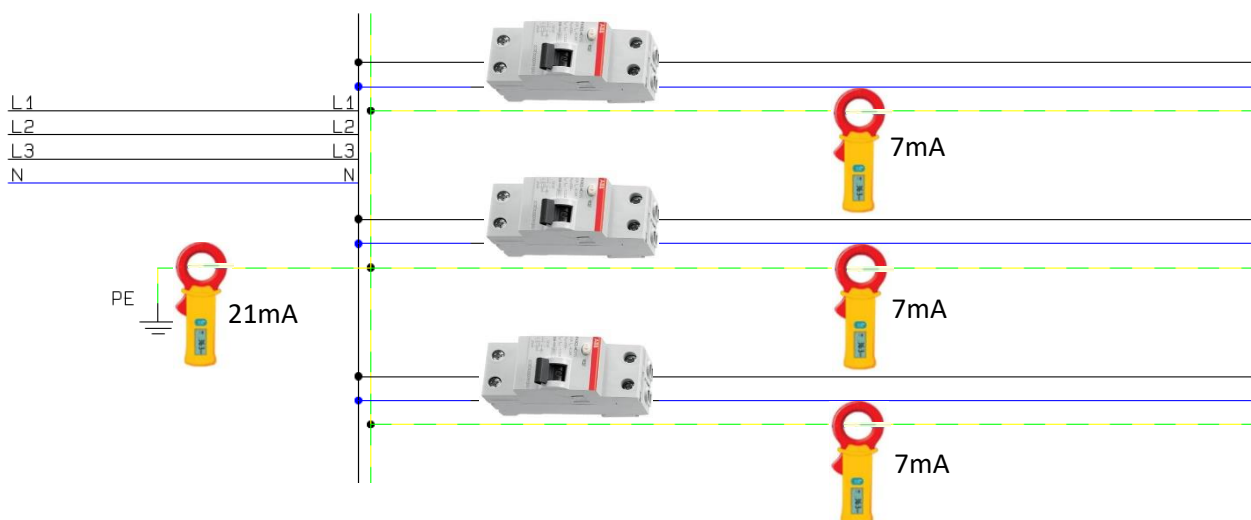
Under normale driftsforhold bør en beskyttelsesjordingsleder ikke fungere som en ledende del for strøm. Hvis strømmen overstiger 10 mA under normale driftsforhold, så skal der korrigeres ved at anvende en forstærket beskyttelsesleder. Det vil altså sige at akkumuleringen af lækstrømmene beskrevet i de tidligere afsnit skal reduceres til maksimalt 10 mA, hvilket man bør bestræbe sig efter via konstruktionen af installationen og tilsluttet materiel.

Hvis ovenstående er tilfældet, så skal beskyttelsesjordingslederen have et tværsnit på minimum 10mm² Cu i hele dens længde, hvis strømforbrugende materiel er forsynet fra en beskyttende jordklemme.³³

³² Merlin Gerin - Driftssikkerhed & følsomme installationer - Katalog 2007/08 (Danmark)

³³ DS/HD 60364 Bind 1&2 - 4. udgave - 543 Beskyttelsesledere 543.6-543.7

Hvis vi forestiller os 3 stk. 2 polede kombi-afbrydere der forsyner downstream fra samme fase, så vil vi principielt kunne have 7 mA lækstrøm for hver strømkreds. Akkumuleringen vil blive 21 mA i jordingslederen, men den enkelte kombi-afbryder vil ikke udkoble da afvigelsen på 7 mA ikke vil være nok.



Figur 28 - Akkumuleringen af lækstrømme i beskyttelsesjordingslederen

Hvis belastningerne er ligeligt fordelt på de 3 faser, så vil akkumuleringen af lækstrømmene være lig nul. Det skyldes at belastningerne bliver vektorielt sammenlagt. Hvis strømmen er af ren jævnstrøm, vil akkumuleringen af strømmene fra hver fase dog blive lagt sammen, og der vil altså her ikke ske en vektoriel neutralisering af strømmene. Dette synliggør bare at den stigende tendens af jævnstrømsbelastninger er med til at besværliggøre lækstrømmens størrelse ved estimering og beregning. Kun ved brug af et egnet måleinstrument kan man fastslå den nøjagtige strømværdi.

7.6. Delkonklusion

Vi har i afsnittet fundet ud af at akkumuleringen af lækstrømme ikke må overstige 30 procent af fejlstrømsafbryderens mærkeudløserstrøm. Er dette tilfældet, skal installationen deles op på flere fejlstrømsafbrydere.

Jeg har kort forklaret typerne A og B for fejlstrømsafbryderen, hvor der ved rene DC-belastninger vil en type B være påkrævet. Dog kan en type A klare op til 6mA overlageret DC. Det spændende ved fejlstrømsafbryderne er at vi har fundet ud af at der findes immunitetsudgaver, som har en lille tidsforsinket teknologi. Dette gør at fejlstrømsafbryderen ikke udkobler på pludselige korte lækstrømme og ufarlige højfrekvente lækstrømme.

Vi har fundet ud af at lækstrømmen kan blive større i beskyttelsesjordingslederen end den strøm der gennemløber hver enkelt fejlstrømsafbryder. Dette kan betyde korrektion for ledertværsnittet.

8. Konklusion

Lækstrømme er en elektrisk strøm i en uønsket ledende vej under normale driftsforhold.

I den elektriske installation kan der forekomme konstante lækstrømme i form af 50 Hz, men også overharmoniske lækstrømme som bliver forstærket af grundfrekvensen på de 50 Hz. Der forekommer højfrekvente lækstrømme og ydermere forekommer lækstrømme i flere udgaver som både vekselstrøm og jævnstrøm. De skaber alle risici for uønsket udkobling eller mætning og dermed ingen udkobling. Det skyldes blandt andet den elektronik vi tilslutter den elektriske installation, hvor strømmen gennemløber kondensatorer, støjfiltre og komponenter hvor strømmen konverteres til jævnstrøm. Og den hyppige kobling ved brugen af thyristorer eller transistorer.

I kabler opstår der lækstrømme gennem de strømførende ledere til jord gennem kablernes sammenlignelige kondensatorvirkning som i almindelige kondensatorer, og det er ved op- og afladning af kondensatorer der løber en strøm. Kondensatoren mellem lederne i kabler omtales som parasitkapacitanser og strømmens størrelse afhænger af lederdiameter, isolationstykkelse, afstanden mellem lederne, samt isolationsmaterialets dielektricitetskonstant. Sammenligneligt med kondensatoren afhænger strømmens størrelse af arealet af- og afstanden mellem pladerne i kondensatoren samt dielektricitetskonstanten.

Ved symmetrisk belastning vil strømmen i nogen grad kunne blive ophævet, forudsat at det er lineære belastninger. I kombination med periodisk forbrug, vil det være svært at lave en korrekt kalkulation, og man er dermed nødsaget til at estimere lækstrømmens størrelse, eller foretage en måling.

Da ovenstående tilfælde af lækstrømme kan forekomme, kan det være problematisk at vælge det rigtige beskyttelsesudstyr. I nogen tilfælde vil det være nødvendigt med en type B fejlstrømsafbryder i stedet for en type A, da denne kan se overlageret jævnstrøm og højfrekvens, men i mange tilfælde vil en immunitets fejlstrømsafbryder kunne klare opgaven, da den er designet til at håndtere små "Uskyldige" kortvarige lækstrømme samt transienter og ufarlige højfrekvens.

Lækstrømme må ikke være større end 30% af mærkeudløserstrømmen på en fejlstrømsafbryder.

Akkumuleringen af lækstrømmen må ikke være mere end 10 mA i beskyttelsesjordslederen uden at korrigere ledertværsnittet til minimum 10 kvadrat kobber i hele dens længde.

9. Perspektivering

Under opgavens udførelse er jeg blevet gjort bekendt med forskellige former for lækstrømme, hvor blandingen af mange øjebliksværdier fra forskellige sinusformede lækstrømme, vil give den resulterende lækstrøm. Faktorer som asymmetrisk belastning vil også have betydning. I den forbindelse kunne det være spændene at undersøge boliginstallationer under spidsbelastninger via målinger, for at se hvor hårdt belastet installationerne er med lækstrømme på hver fejlstrømsafbryder og beskyttelsesjordingslederen. Helt konkret vil det være spændene at se om de estimerede lækstrømme og måden man projektere lækstrømmen på, stemmer overens med de målte værdier.

Da lækstrømmen optræder som jævnstrøm og vekselstrøm og andre sinusformede belastninger, ville det være spændene at undersøge hvordan man måler disse strømme, og hvilke egenskaber der er i et måleinstrument der gør at disse målinger bliver pålidelige.

Jeg har i opgaven belyst at ved nogen former for belastninger, vil vi risikere mætning af fejlstrømsafbryderen. I den forbindelse vil det være spændende at undersøge grænseværdierne for hvornår jernkernen går i mætning, og forklare teknisk hvad der gør sig gældende ved en mætning.

10. Bibliografi

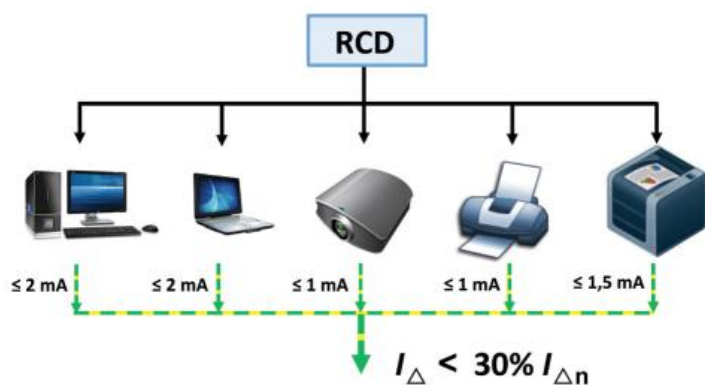
- ABB. (2015). *Technical guide - Protection against earts faults with residual current devices*. Viale dell industria 18, 20010 Vittuone (Italy): ABB.
- Bonde, T. (2018). *Elektroteknik 8 - El-installationsmateriel 5. udgave*. Anker Engelunds vej 1, 2800 Kongens Lyngby: Plyteknisk forlag.
- Dansk standard. (2019). *Standardsamlingen til installationsbekendtgørelsen - DS/HD 60364-serien 4. udgave*. Göteborg plads 1, 2150 Nordhavn: Dansk Standard.
- Evans, P. (18/05. Maj 2020). Hentet fra the engineering mindset: <https://theengineeringmindset.com/>
- Folkvardesen, F. (Maj 2020). Lækstrømme og utilsigtede udkoblinger. (N. Josefsen, Interviewer)
- Gerin, Merlin. (2007). *Beskyttelse mod uønsket udkobling og transienter*. 2750 Ballerup: Schneider Electric Denmark A/S.
- industries, Eaton. (2017). *Reidual Current Devices - Application guide*. 1210 Vienna, Austria: Eaton.
- Lauritsen, F. (2016). *Grundlæggende elektroteknik*. Ny Vestergade 17, København K: Praxis - Nyt Teknisk Forlag.
- nkt.dk. (2017). *Teknisk katalog*. Toftegårdsvej 25, 4550 Asnæs: NKT.
- Schneider Electric . (2018). *Electrical installation guide*. 92506 Rueil Malmaison Cedex, France: Schneider electric industries SAS.

11. Bilag 1 - Apparater og lækstrømme

■ Tabel over lækstrømme

Elektrisk udstyr	Målt lækstrøm (mA)
Faxmaskine	0,5 til 1
Printer	<1
Arbejdsstation (PC, skærm og printer)	1 til 3
Fotokopierings- maskine	0,5 til 1,5
Gulvvarme	1 mA / kW
Enfasede og trefasede filtre	1 mA / belastning

Figur 29 - Merlin Gerin Driftssikkerhed og følsomme installationer katalog 2007/08 side 10



Typical values of leaking current:

- computers 1 - 2 mA
- print machines 0,5 – 1 mA
- copy machines 0,5 – 1,5 mA
- filters, ilumiscent lights 1 mA

Fig. 75 Leaking current of office equipment

Figur 30 - Eaton Applikation device fig. 75

In the absence of more precise data, permanent leakage current in a given installation can be estimated from the following values, measured at 230 V 50 Hz:

- Single-phase or three-phase line: 1.5 mA / 100m
- Heating floor: 1mA / kW
- Fax terminal, printer: 1 mA
- Microcomputer, workstation: 2 mA
- Copy machine: 1.5 mA

Figur 31 - Schneider Electric. (2018). Electrical installation guide 7.4 sensitivity of RCDs to disturbance