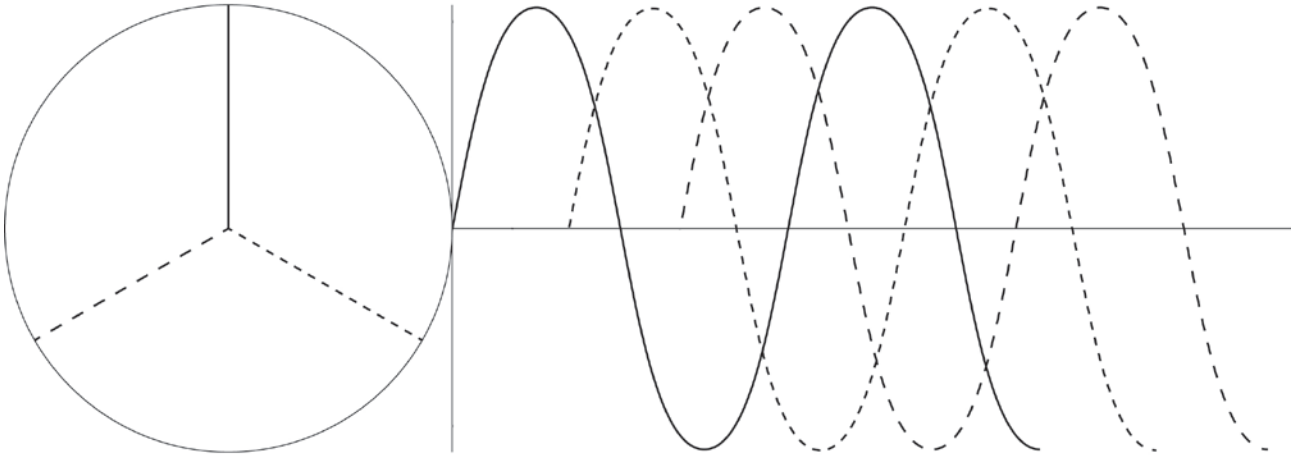
Afsluttende projekt

SPÆNDINGSKVALITET



Kenny Bengtson

Vejleder: Niels Winther Hansen

FORORD **2**

PROBLEMSTILLING **2**

DEL 1 - KORTSLUTNINGSBEREGNINGER **3**

INDLEDNING **3**
SAMMENLIGNING AF FORSKELLIGE BEREGNINGSMETODER OG MÅLING **3**
REFLEKSIONER 5
KONKLUSION 5

DEL 2 - SPÆNDINGSKVALITET **6**

INDLEDNING **6**
AFGRÆNSNING **6**
GRUNDLÆGGENDE TEORI **7**
HARMONISK FORVRÆNGNING 7
CRESTFACTOREN 10
POWER FACTOR OG COSΦ 10
TOTAL HARMONISK FORVRÆNGNING 11
BRUGSGENSTANDE 12
STANDARTER OG NORMER 13
SPÆNDINGSANALYSE **14**
SPÆNDINGSKURVE 15
THD 15
SPÆNDINGS UBALANCE 16
NULSTRØMME 17
FASEFORSKYDNING 19
DERATING AF TRANSFORMER 20
METODER TIL AT FJERNE HARMONISKE OVERTONER **21**

KONKLUSION **23**

KILDER **24**

BILAG **25**

Forord

Mit formål med dette projekt er at få gjort teori til virkelighed og samtidig fordybe mig i to emner, som jeg synes er spændende. Jeg har valgt at fokusere på spændingskvalitet samt at undersøge en enkelt kortslutningsberegning. Igennem mit praktikophold hos CWN Rådgivende Ingeniører, har jeg haft adgang til en hovedtavle i et større kontorhus og har brugt dette til mine målinger.

Rapporten er delt op i 2, hvoraf 2. del omhandler problemstillingen.

- 1. del – Kortslutningsberegning
- 2. del – Spændingskvalitet, grundlæggende teori og analyse

Problemstilling

I hvilken grad påvirker de forskellige tilsluttede brugsgenstande, spændingskvaliteten i en moderne kontorbygning?

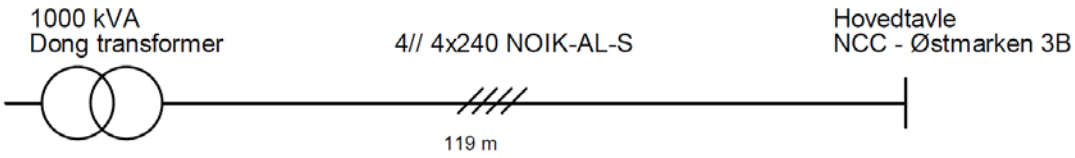
- *Hvilke belastninger bidrager til harmonisk forvrængning?*
- *Hvor meget harmonisk forvrængning opstår der? Og hvad er konsekvenserne?*
- *Hvordan minimerer man harmonisk forvrængning?*

Del 1 - Kortslutningsberegninger

Indledning

Igennem de sidste 2 år har vi i skolen lavede et utal af kortslutningsberegninger uden at vide om de er i trit med virkeligheden. Nu har jeg fået muligheden for at sammenligne de forskellige beregningsmetoder vi har lært samt NKTdocs beregninger med virkelige målinger. Jeg har fået lov til at måle på NCC hovedkvarter på Østmarken 3B i Søborg. Transformeren er placeret ved Østmarken 5 hvilket giver en lang stikledning. Net og transformer installationer har jeg fået oplyst af DONG Nettilslutning og ABB Danmark. Jeg vil sammenligne beregningsmetoder for IK_{min}.

Sammenligning af forskellige beregningsmetoder og måling.



Transformer ABB EcoDry

$U = 10/0{,}4\ \text{kV}$
$S = 1.000\ \text{kVA}$
$e_k = 6{,}0\ \%$
$P_{CU} = 9{,}5\ \text{kW}$

$$I_{1/1} = \frac{S}{U_N \cdot \sqrt{3}} = \frac{1000 \cdot 10^3}{400 \cdot \sqrt{3}} = 1443{,}4\ \text{A}$$

$$R_T = \frac{P_{CU}}{3 \cdot I_{1/1}^2} = \frac{9.500}{3 \cdot 1443,4^2} = 1{,}52\ \text{m}\Omega$$

$$Z_T = \frac{U_N^2 \cdot eK}{Sn \cdot 100} = \frac{400^2 \cdot 6}{1.000 \cdot 10^3 \cdot 100} = 9{,}6\ \text{m}\Omega$$

$$X_T = \sqrt{{Z_T}^2 - {R_T}^2} = \sqrt{9{,}6^2 - 1{,}52^2} = 9{,}48\ \text{m}\Omega$$

$$\varphi = cos^{-1}\left(\frac{R_T}{Z_T}\right) = cos^{-1}\left(\frac{1{,}52}{9{,}6}\right) = 80{,}89°$$

Kabel 4x240mm² NOIK-AL-S

$r_1 = 0{,}127\ \Omega$
$x_1 = 0{,}077\ \Omega$
$r_0 = 0{,}508\ \Omega$
$x_0 = 0{,}310\ \Omega$

Beregning 1 – Synkron + invers + nulsystem

IKmin Hovedtavle

$$IKmin_{F-PEN} = \frac{U_N \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot (R_T + jX_T) + \frac{2 \cdot l(1{,}5 \cdot r_1 + jx_1) + l(1{,}5 \cdot r_0 + jx_0)}{4}}$$
$$= \frac{400 \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot (1{,}52 + j9{,}48) + \frac{2 \cdot 119(1{,}5 \cdot 0{,}127 + j0{,}077) + 119(1{,}5 \cdot 0{,}508 + j0{,}31)}{4}}$$
$$= (\mathbf{12.112} \angle -\mathbf{47,6})\mathbf{A}$$

Beregning 2 - Normal-kompleks

IKmin Hovedtavle

$$\mathrm{IKmin}_{\mathrm{F-PEN}} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot \left((R_T + jX_T) + \frac{2 \cdot l(1{,}5 \cdot r_1 + jx_1)}{4}\right)}$$
$$= \frac{400}{\sqrt{3} \cdot \left((1{,}52 + j9{,}48) + \frac{2 \cdot 119(1{,}5 \cdot 0{,}127 + j0{,}077)}{4}\right)}$$
$$= (\mathbf{12.121} \angle -\mathbf{47,6})\mathbf{A}$$

Aflæsning – NKTdoc

IKmin Hovedtavle

$\mathrm{IKmin}_{\mathrm{F-PEN}} = \mathbf{11.215\ A}$

Måling med Eurotester AX

IKmin Hovedtavle

$\mathrm{IKmin}_{\mathrm{F-PEN}} = \mathbf{11.300\ A}$

Omskrivning af synkron+invers+nulsystem til normal-kompleks
(med udgangs punkt i at x_0 og r_0 værdierne er 4 gange så store som x_1 og r_1 værdierne)

$$\text{Synkron} + \text{invers} + \text{nulssytem} = \frac{U_N \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot (R_T + jX_T) + \frac{2 \cdot l(1{,}5 \cdot r_1 + jx_1) + l(1{,}5 \cdot r_0 + jx_0)}{4}}$$

$$\Leftrightarrow \frac{U_N \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot (R_T + jX_T) + \frac{2 \cdot l(1{,}5 \cdot r_1 + jx_1) + 4 \cdot l(1{,}5 \cdot r_1 + jx_1)}{4}}$$

$$\Leftrightarrow \frac{U_N \cdot \sqrt{3}}{3 \cdot (R_T + jX_T) + \frac{6 \cdot l(1{,}5 \cdot r_1 + jx_1)}{4}}$$

$$\Leftrightarrow \frac{U_N}{3 \cdot \sqrt{3}^{-1} \cdot (R_T + jX_T) + \frac{6 \cdot \sqrt{3}^{-1} \cdot l(1{,}5 \cdot r_1 + jx_1)}{4}}$$

$$\Leftrightarrow \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot \left((R_T + jX_T) + \frac{2 \cdot l(1{,}5 \cdot r_1 + jx_1)}{4}\right)} = \text{normal kompleks}$$

Refleksioner

Forskellen i mine IKmin resultater for synkron+invers+nulsystem og normal kompleks skyldes at den angivne værdi for X_0[1] ikke helt er 4 gange så stor som X_1.

Grunden til forskellen på de beregnede og de aflæste i NKTdoc ligger i korrektionsfaktorerne. NKTdoc beregner ud fra standarten BS7638. Jeg har desværre ikke haft mulighed for at skaffe adgang til denne standard. Men har kunnet se at ABB[2] korrigerer med 1,5 for opvarmning og derefter yderligere 1,2 på ledningsresistansen. Siemens[3] korrigerer endvidere netspændingen med C-faktoren, 0,95 ved IK_{min}. Man må formode at NKT også bruger nogle af disse korrektionsfaktorer.

Man kan ikke regne 100% med målingen, da der ligger en betydelig modstand i måleprober, måleledninger og i kontaktpunktet mellem måleproberne og tavlens skinner. Målingen kan en anden dag også være anderledes pga. omkoblinger i nettet.

Ydermere er netimpedansen i både NKTdocs- og i mine beregnede resultater, sat til 0.

Konklusion

Beregning med normal-kompleks og synkron-invers-nulsystem er fuldstændig ens. De beregnede- og NKTdocs resultater er ens indenfor 7%. Denne gang var NKTdoc tættest på, næste gang man måler det kan det være, at de beregnede der er tættest på. Jeg vil i fremtiden bruge NKTdoc til at lave kortslutningsberegninger, da det tager en brøkdel af den tid, det tager at beregne dem.

[1] NKT – teknisk katalog
[2] ABB Sace – Electrical installation handbook volume 2
[3] Siemens vejledning for SIMARIS Design software

Del 2 - Spændingskvalitet

Indledning

Igennem elektrikeruddannelsens hovedforløb, omtalte underviserne 3. harmoniske strømme som noget meget mystik og kom aldrig nærmere ind på hvad det drejede sig om. Derfor glædede det mig at man på 3. semester af installatøruddannelsen, kunne vælge spændingskvalitet som valgfag. Min interesse for spændingskvalitet blev yderligere styrket, da jeg i mit praktikophold oplevede at dårlig spændingskvalitet er et reelt problem. På den baggrund besluttede jeg mig for at skrive om spændingskvalitet i mit afsluttende projekt.

For at kunne lave en analyse har jeg logget strøm- og spændingsforbruget på NCCs hovedtavle på Østmarken 3B i Søborg.

Afgrænsning

Spændingskvalitet er mange ting bl.a.

- Flicker
- Harmonisk forvrængning
- Netfrekvens
- Spændingsniveau
- Spændings ubalance

I denne del af rapporten, beskæftiger jeg mig med harmonisk forvrængning og spændings ubalance. Jeg vil først beskrive de forskellige begreber inden for de to emner og derefter analysere målingerne fra NCCs hovedtavle, med henblik på at mindske harmoniske forvrængning og effekten på andre aftagere. Jeg vil ikke redegøre økonomisk for mine løsningsforslag.

Grundlæggende teori

Harmonisk forvrængning

Harmoniske spændinger opstår pga. harmoniske strømme. Harmoniske strømme opstår pga. tilsluttede ikke-lineære belastninger.

Lineære belastninger:

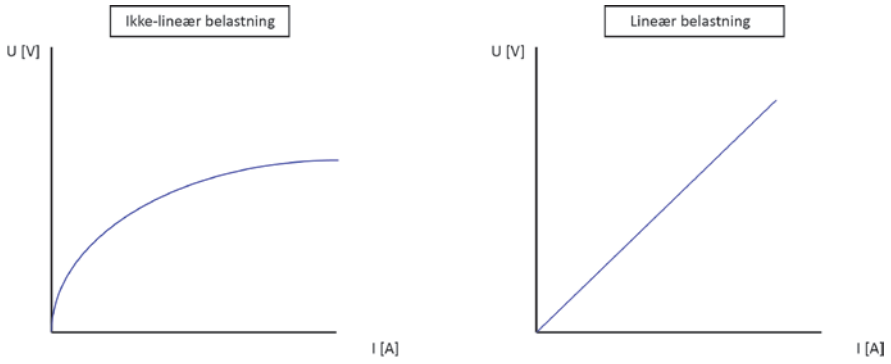
- Gløde-/halogenpære
- Motorer uden frekvensomformer
- Varmelegemer

Ikke-lineære belastninger (power-elektronik):

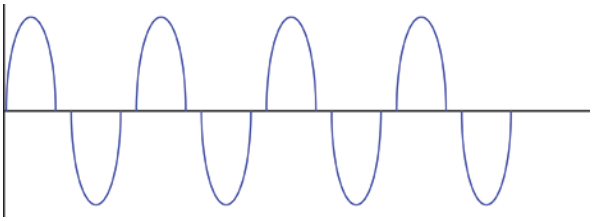
- SMPS, Switched Mode Power Supplys (findes i de fleste strømforsyninger til computere og lign.)
- IGBT, Insulated Gate Bipolar Trinsistor (bruges i de fleste frekvensomformere, køleskabe, køleanlæg osv.)
- HF-koblinger
- LED-belysning
- Lysdæmpning

Stort set alle brugsgenstande som man anvender i dag indeholder power-elektronik og skaber harmoniske strømme.

Forskellen på de to belastningstyper er at, ved lineære belastninger følges strømmen og spændingen ad, det gør de derimod ikke ved ikke-lineære belastninger.

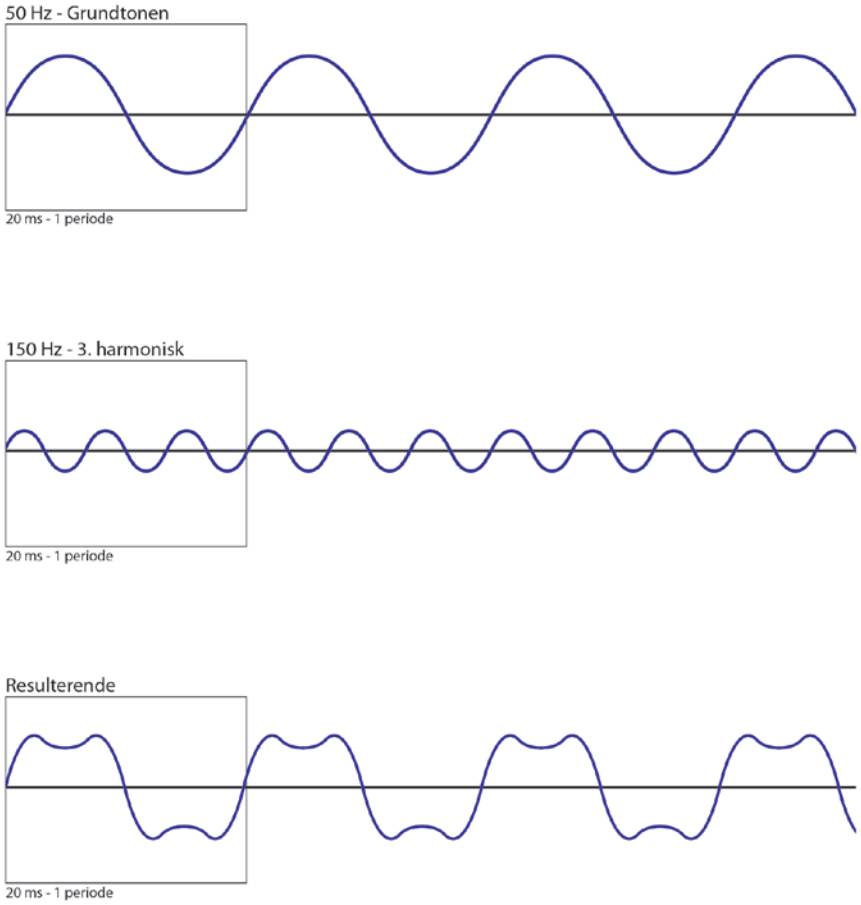


De mange pulser som der fremkommer, når man laver AC om til DC. Elektronikken trækker den strøm den behøver og cutter-off, dette gør den mange gange i sekundet og det gør at kurven bliver ikke-lineær.



En anden effekt af de mange pulser er også at strømkurven ikke bliver sinusformet. Pulsenes frekvens, forvrænger kurven og skaber derved harmoniske overtoner. Pulsene er smallere og spidsere end grundtonen og giver derved en resulterende kurve, der næsten er sinus formet, men med højere frekvens end grundtonen.

De forskellige harmoniske overtoner kaldes 2., 3., 4. op til 50. harmonisk efter faktoren som deres frekvens er større end grundtonens frekvens. Overtoner over 50. harmoniske betagnes som EMC støj. Den 1. harmoniske(grundtonen), har altså 50 Hz, den 2. harmoniske har 100 Hz og så fremdeles.



Som det ses på illustrationen, forvrænges grundtonen af den 3. harmoniske overtone. Alle de harmoniske overtoner, forvrænger grundtonen og gør at den bliver hakket. Man kan analysere en forvrænget kurve og dele den op i grundtonen og overtoner ved hjælp af en Fourier-analyse. Men det er en meget tidskrævende og omstændig proces. I praksis anvender man et spændingsanalyse apparat. Dette kommer jeg ind på i afsnittet om spændingsanalyse.

De forskellige overtoner, kan deles op i 3 grupper:

Gruppe A	0 sekvens
Gruppe B	+ sekvens
Gruppe C	- sekvens

Og fordeler sig således:

G.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.	Osv.
+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	

Ud fra formlerne:

$$+ sekvens\ n = 3 \cdot k + 1\ (k = heltal)$$

$$- sekvens\ n = 3 \cdot k - 1\ (k = heltal)$$

Da alle overtoner har højere frekvens end grundtonen, øges deres reaktans og derved stiger impedansen hvilket skaber øget varmetab i kabler og koblingsudstyr.

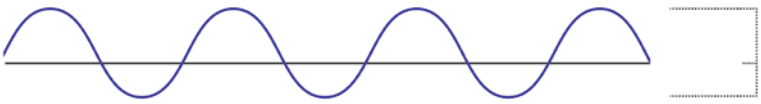
$$X_L = 2 \cdot \varphi \cdot f \cdot l$$

Gruppe A skaber større nulstrøm og kan bevirke at strømmen i nullederen overstiger strømmen i faselederen. Man bruger SB side 193, når man skal dimensionere et sted, hvor man forventer at der opstår overtoner i denne gruppe.

Grubbe B skaber øget varmetab.

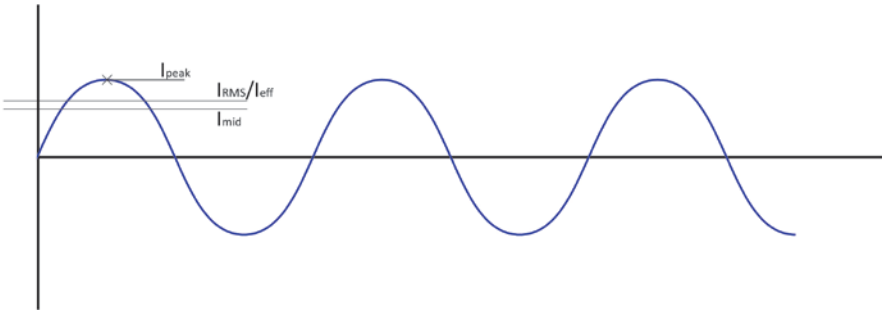
Grubbe C Skaber modmoment, da f.eks. den 5. harmoniske fra fase 1 ligger i fase med fase 2 og det får motorer til at "modarbejde" deres eget drejefelt og temperaturen stiger derved.

Lige harmoniske overtoner kan placeres i en gruppe sig selv. De er meget ødelæggende for spændingenskvaliteten, men opstår ikke så tit. De opstår når strømmen har et stort DC-indhold. DC-indholdet i de lige-harmoniske overtoner "trækker" sinus kurven op fra nulpunktet og skaber derved halvbølgeasymmetri.



Crestfactoren

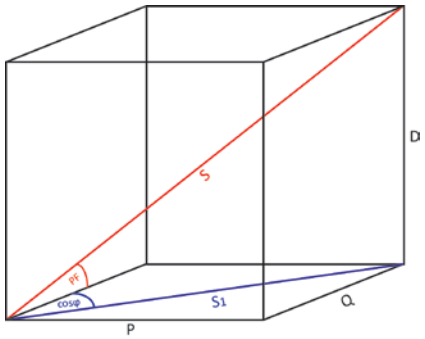
Crestfactoren forkortes CF og kaldes på dansk topfaktoren. CF beskriver forholdet imellem amplituden- og middelværdien i en kurve. I en perfekt sinuskurve er forholdet $\sqrt{2}$(~1,41). CF kan bruges til at give en indikation af om der er harmonisk indhold i strømmen. De mange spidse pulser med en høj amplitude får CF til at stige til højere end 1,41.



Power factor og cosφ

Ved belastning uden harmonisk indhold vil PF og cosφ være ens. Men lige så snart at strømmen begynder at have et harmonisk indhold vil PF blive lavere end cosφ.

Vektordiagrammet for effekten med harmonisk indhold vil se således ud:



Hvor:

$\boldsymbol{P}$ = Virke effekt [W]

$\boldsymbol{S}$ = Tilsyneladende effekt [VA]

$\boldsymbol{S_1}$ = Tilsyneladende effekt, uden harmonisk indhold [VA]

$\boldsymbol{Q}$ = Reaktiv effekt [VAr]

$\boldsymbol{D}$ = Forvrænget effekt [VA]

$$\boldsymbol{cos\varphi} = \left(\frac{P}{S_1}\right)$$

$$\boldsymbol{PF} = \left(\frac{P}{S}\right)$$

Ud fra formlen:

$$D = U_n \cdot \sqrt{\sum_{H=2}^{H=\infty} I_H^2} => 400 \cdot \sqrt{0^2} = 0$$

Kan man se at hvis det harmoniske indhold er 0, vil PF og cosϕ være ens.

Total harmonisk forvrængning

TDHi og THDu står for total harmonisk forvrængning (Total Harmonic Distortion) af hhv. strøm og spænding. Det er et udtryk for forholdet mellem grundtonen(50 Hz) og overtonerne (100, 150, 200 osv.). Man vil altid have en så lav THD, og derved harmonisk indhold, som muligt. THD beregnes ved at dividere kvadratroden af kradratsummen af alle de harmoniske overtoner med grundtonen:

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{H=2}^{H=\infty} u_H^2}}{U_{1H}} \qquad THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{H=2}^{H=\infty} i_H^2}}{I_{1H}}$$

Mange nyere tavlefront-multimetre kan vise disse. Eksempelvis Schneider-electrics PM800 serie:



Disse multimetre viser kun THD i realtid men kan ikke logge. Men de er gode til at give en indikation på at der er noget galt. Hvis man konstaterer at THD til tider overstiger grænseværdien på 8%4. Bliver man nødt til at få analyseret spændingskvaliteten med en "Power Quality Analyzer". Eksempelvis Flukes 430 serie:



Man tilslutter fire flex-strømtransformere, L1, L2, L3 og N. Derefter tilslutter man fem spændingsprober, L1, L2, L3, N og Jord. Der ved kan apparatet måle strøm og spænding og beregne sig frem til andre ønskede værdier. Det viser målinger i realtid og målingerne kan logges over en periode. For at få et ordenligt billede af installationens tilstand logger man forbruget over en hel arbejdscyklus, dvs. 7 dage for normale kontorbyggerier, men mere eller mindre for f.eks. produktionslinjer eller andre steder der ikke følger en normal arbejdsuge.

[4] DS/EN 50160 – 4.2.5

Brugsgenstande

Alt efter brugsgenstandenes opbygning med ensrettere og kondensatorer, skaber de forskellige overtoner.

Hvis man kender opbygningen af sine brugsgenstande kan man finde ud af hvilke overtoner, de skaber ved at anvende denne formel:

$(n \cdot p) \pm 1$=harmoniske overtoner

Hvor:
n= hel tal
p=pulser (antal dioder i ensretterens brokobling)

Derved kan man se at 4-, 6- og 12 puls ensrettere skaber disse overtoner:

4 puls ensretning:

$(1 \cdot 4) \pm 1 =$ 3. og 5. harmoniske
$(2 \cdot 4) \pm 1 =$ 7. og 9. harmoniske
$(3 \cdot 4) \pm 1 =$ 11. Og 13. Harmoniske

6 puls ensretning:

$(1 \cdot 6) \pm 1 =$ 5. og 7. harmoniske
$(2 \cdot 6) \pm 1 =$ 11. og 13. harmoniske
$(3 \cdot 6) \pm 1 =$ 17. og 19. harmoniske

12 puls ensretning:

$(1 \cdot 12) \pm 1 =$ 11. og 13. harmoniske
$(2 \cdot 12) \pm 1 =$ 23. og 25. harmoniske
$(3 \cdot 12) \pm 1 =$ 35. og 37. harmoniske

4 puls ensretning bruges i enfaset små-elektronik, hvorimod 6-puls ensretning anvendes ofte i små trefasede frekvensomformere og 12 puls ensretning anvendes i større trefasede frekvensomformere[5].

Omvendt kan man også anvende formlen til at spore hvilke brugsgenstande der skaber de overtoner man har i sin installation.

For at kunne anvende det overstående til min analyse, har jeg lavet dette skema:

Belastning	**Typiske overtoner**
Enfaset elektronik	Alle ulige overtoner
Mindre trefaset elektronik	5. – 7. – 11. – 13. – 17.
Større trefaset elektronik	11. – 13. – 23. – 25.
Lysbueovne og svejseværk	5. – 7.

[5] GE Energy - GE Ultra Efficient Harmonic Mitigating Transformer - FAQ

Standarter og normer

Af relevante standarter og normer kan nævnes:

- EN60150
- DEFU Rekommandation 16
- EN61000
- Stærkstrømbekendtgørelsen afsnit 6

EN60150 beskriver grænseværdier for spændingskvalitet i det offentlige net. Grænseværdierne i Flukes måleapparat er fra denne standard. Det er også denne standard jeg tager udgangspunkt i, i min analyse.

DEFU Rekommandation 16 beskriver ligeledes grænseværdier for det offentlige net. Men er sammendrag af EN60150, EN61000 samt andre DEFU rekommandationer.

EN61000 beskriver grænseværdier for hvor meget harmonisk- og EMC støj, brugsgenstande må udlede.

Stærkstrømbekendtgørelsen afsnit 6 beskriver at man skal tage højde for 3. harmoniske overtoner[6](og andre af betydning) når man dimensionerer og at man ikke må bruge reduceret nul-tværsnit, hvis THDi overstiger 10%[7].

[6] Stærkstrømsbekendtgørelsen afsnit 6 – Bilag C til kapitel 52
[7] Stærkstrømsbekendtgørelsen afsnit 6 – 523.5.3

Spændingsanalyse

Som tidligere bekrevet har jeg logget spænding og strøm på NCCs hovedtavle i deres hovedkvarter i Søborg. Huset er fordelt på 5 etager. Primært med arbejdspladser til de ansatte. Alle Ansatte har en bærbar computer med en tilsluttet SMPS, alt lys er med højfrekvente forkoblinger og dæmp, der er installeret ventilationsanlæg med køl samt 2 elevatorer, derfor forventede jeg at strømmen ville have et harmonisk indhold. Alle IT-systmer er hostet eksternt, en stor server park med tilsluttet UPS, ville ellers have bidraget betydeligt til det harmoniske indhold. NCC har dog en lille UPS tilsluttet, som vil bidrage en smule til det harmoniske indhold (se Bilag 2).

I dette afsnit vil jeg analysere:

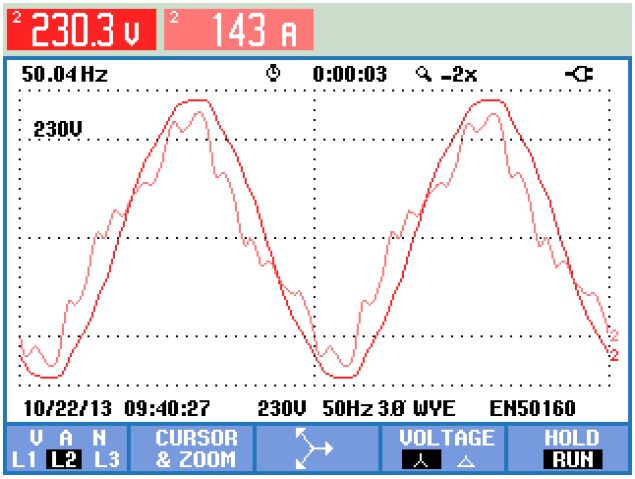
- Spændingskurven
- THD
- Spændings ubalance
- Nulstrømme
- Konsekvenser for transformeren
- Kilder til harmoniske overtoner

Til min analyse vil jeg anvende udlæste værdier fra Fluke samt den grundlæggende teori, beskrevet i de tidligere afsnit.

Jeg har taget udgangspunkt i et enkelt, af de mange loggede målinger. Det er fra d. 16/10-13 om formiddagen, hvor THDu peakede. THDi peakede dog hver nat mellem kl. 00.00 og 00.02. Men da det samlede forbruget var minimalt, har det ingen betydning.

Spændingskurve

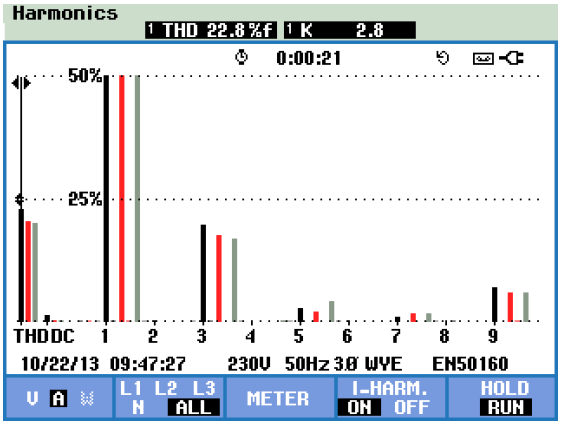
Det første jeg kiggede på da jeg fik sat apparatet til var om spændingskurven så fin ud. Da det jo er den det hele handler om. På screenshot 1 kan man se at spændingskurven næsten er helt sinusformet, den har lidt hakker og er lidt fladtoppet. Derimod er strømkurven meget hakket. At spændingskurven er forholdsvis pæn og ikke lader sig forvrænge af strømkurven skyldes at installationen er tilsluttet et stærkt net. Hvis installationen har været tilsluttet et svagt net, med en høj impedans og lille kortslutningsniveau, havde spændingskurven været mere forvrænget.



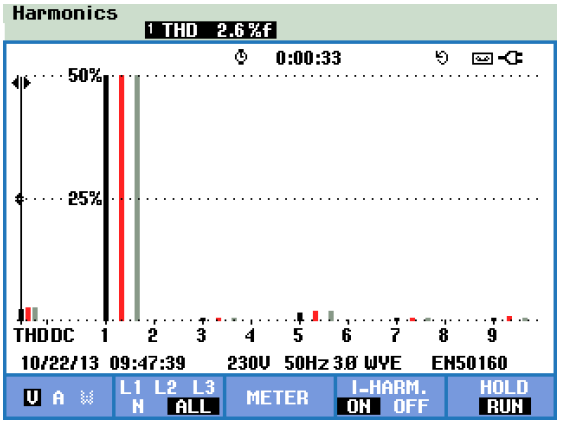
Screenshot 1

THD

På screenshot 2 vises THDi – strømmen har et højt harmonisk indhold men kun et meget lille DC-indhold. Det lave DC-indhold bevirker at kurvene på screenshot 1 er halvbølgesymmetriske. Igen ses det på screenshot 3 at THDu ikke lader sig påvirke af den høje THDi i nogen særlig grad. Kravet til en maks. THDu på 8%[8] er overholdt.



Screenshot 2



Screenshot 3

Da indholdet at harmoniske overtoner primært er 3. og 9. betyder det at forvrængningen skyldes en-fasede brugsgenstande. Dvs. bærbarbare computere og HF-koblinger.

[8] EN60150 – 4.2.5

Spændings ubalance

Ubalance i spændingen opstår når strømforbruget på de tre faser er asymmetrisk. Asymmetrisk både i forhold til ampere og vinkel. Den totale ubalance kan beskrives i procent ved at gange forholdet mellem den negative og den positive sekvens med 100.

$$\%\, ubalance = \frac{Negativ\ sekvens}{Positiv\ sekvens} \cdot 100$$

Den normale sekvens er hvor faserne ligger i korrekt rækkefølge med 120 grader i mellem hver. I den positive sekvens lægger man fase 2 og 3 op i fase 1 og i den negative sekvens bytter fase 2 og fase 3 plads.



$$Negativ\ sekvens = \frac{U_{fL1} + U_{fL2} \cdot (1\angle -120) + U_{fL3} \cdot (1\angle 120)}{3}$$

$$Positiv\ sekvens = \frac{U_{fL1} + U_{fL2} \cdot (1\angle 120) + U_{fL3} \cdot (1\angle -120)}{3}$$

Man kan også beregne ubalancen på en mere simpel måde:

$$\%\, Ubalance = \frac{U_{max} - U_{mid}}{U_{mid}} \cdot 100 = \frac{235{,}81 - \frac{235{,}14 + 234{,}86 + 235{,}81}{3}}{\frac{235{,}14 + 234{,}86 + 235{,}81}{3}} \cdot 100 = 0{,}23\%$$

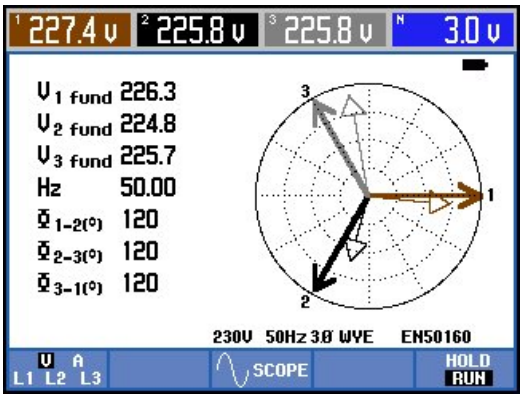
Værdier udlæst fra fluke:

Unbalance Vn	0,17%
Unbalance Vz	0,1%
Unbalance An	5,97%
Unbalance Az	2,09%

Det beregnede resultatet stemmer ikke overens med de udlæste fra Fluke. Det er fordi at Fluke bruger en 3. metode som ifølge Marianne Kolstad, fra Fluke, er beskrevet i EN61000-4-30, som jeg ikke har haft adgang til.

Som det kan ses på det udlæste resultat er der kun meget lidt ubalance og grænseværdien på 2%[9] er langt fra overskrævet. Dette skyldes til dels at faserne er tæt på symmetrisk belastede og at installation er tilsluttet et stærkt net.

Fluke kan også vise ubalancen på denne måde(billedet er fra fluke.com, da jeg desværre ikke fik taget dette screenshot i min egen logning):



Her man se værdier for længden på spændingsvektorerne og vinkel imellem dem. Fluke viser også længden på strømvektorerne og vinklen φ i forhold til spændingsvektorerne, dog uden værdier da "Volt" er valgt.

[9] DS/EN 50160 - 4.2.4

Nulstrømme

Der er 2 kilder til nulstrømme, asymmetrisk belastning og de harmoniske overtoner der opsummeres i nullen.

L1	L2	L3	N
$(155\angle -16{,}2)\mathrm{A}$	$(141\angle -120 + -18{,}2)\ \mathrm{A}$	$(155\angle 120 + -19{,}9)\mathrm{A}$	$83\ \mathrm{A}$

(værdierne er beregnet ud fra PF vinklen - se bilag 1)

Selvom faserne er tæt på symmetrisk belastede er der stadig en høj nulstrøm. Jeg vil beregne hvor stor del af nulstrømmene er skyldes asymmetrisk belastning.

$$I_N = I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} = (155\angle -16{,}2) + (141\angle -120 + -18{,}2) + (155\angle 120 + -19{,}9) = (22{,}6\angle 42{,}9)\mathrm{A}$$

Kun 22,6A af de 83A nulstrøm skyldes asymmetrisk belastning, derved skyldes de resterende 60,4A summering af harmoniske overtoner.

Dette forklarer også at der i spreadsheet står at THDi i nullen er over 300%

$$\frac{22{,}6 \cdot 100}{83} = 367\%$$

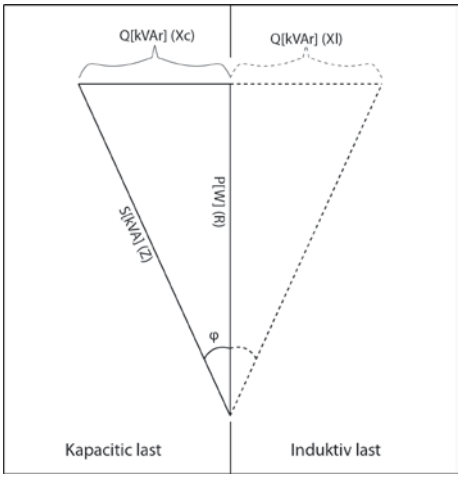
Faseforskydning

I forbindelse med mit praktikophold, viste et tavlemultimeter på et universitet, en negativ værdi for cosφ.

På mine målinger fra NCC vises den reaktive effekt også som negativ.

Active Power	33,073 kW
Apparent Power	34,485 kVA
Reactive Power	-10,083 kvar

De negative fortegn betyder at lasten er overvejene kapacitet i stedet for overvejende induktiv, som vi er vant til. Det skyldes de mange kondensatorer der er i installationen. I eksemplet fra mit praktikophold var den primære last belysning, som udelukkende var udført med LED lyskilder. Hos NCC skyldes det bl.a. de mange SMPS elektronik strømforsyninger.



Effekten og vinklen er dermed ikke negativ, men det er en metode til at beskrive at lasten er overvejende kapacitiv.

Derating af transformer

En af konsekvenserne ved et højt harmonisk indhold, er at transformeren bliver overophedet og derved ikke kan yde den påtrykte effekt. Derfor derater man transformeren i forhold til det harmoniske indhold. Dette er en konsekvens af højst harmonisk indhold som både gælder i stærke og svage net.

Deratting af NCCs transformer:

Metode 1 (Harmonic Derating Factor – HDF):

Function	Duration	L1N(V) / L1(A) Min	L1N(V) / L1(A) Avg	L1N(V) / L1(A) Max	L2N(V) / L2(A) Min	L2N(V) / L2(A) Avg	L2N(V) / L2(A) Max	L3N(V) / L3(A) Min	L3N(V) / L3(A) Avg	L3N(V) / L3(A) Max	LNG(V) / N(A) Min	LNG(V) / N(A) Avg	LNG(V) / N(A) Max
Voltage		234,61 V	235,14 V	235,56 V	234,31 V	234,86 V	235,4 V	235,31 V	235,81 V	236,42 V	0,04 V	0,05 V	0,05 V
Current		0,146 kA	0,155 kA	0,173 kA	0,129 kA	0,141 kA	0,162 kA	0,143 kA	0,155 kA	0,171 kA	0,079 kA	0,083 kA	0,086 kA
Peak Voltage		330,7 V	331,7 V	332,4 V	330,9 V	331,8 V	332,6 V	332,8 V	333,7 V	334,5 V	0,1 V	0,1 V	0,2 V
Peak Current		248 A	260 A	286 A	216 A	234 A	264 A	246 A	264 A	290 A	136 A	152 A	174 A

	I_{RMS}	I_{peak}
L1	155	260
L2	141	234
L3	155	264
Middelsum	150	252,7

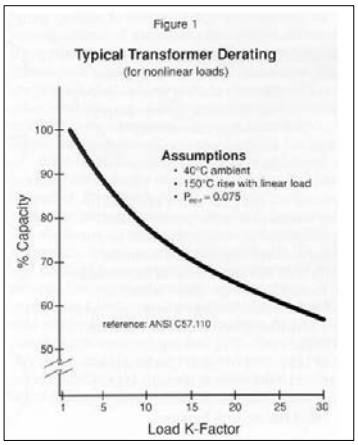
$$HDF = \frac{I_{RMS} \cdot \sqrt{2}}{I_{peak}} = \frac{150 \cdot \sqrt{2}}{252,7} = 0,84$$

Det vil sige at transformeren skal derates til 84%. Altså kan deres 1000 kVA transformer kun yde ca. 840 kVA.

Metode 2 (k-faktor):

Function	Duration	L1N(V) / L1(A) Min	L1N(V) / L1(A) Avg	L1N(V) / L1(A) Max	L2N(V) / L2(A) Min	L2N(V) / L2(A) Avg	L2N(V) / L2(A) Max	L3N(V) / L3(A) Min	L3N(V) / L3(A) Avg	L3N(V) / L3(A) Max	LNG(V) / N(A) Min	LNG(V) / N(A) Avg	LNG(V) / N(A) Max
K-Factor A		2,37V	2,63V	2,79V	2,4V	2,78V	3,07V	2,41V	2,79V	3,03V	19,11V	20,04V	20,74V

Med denne udlæser man k-factoren fra Fluke-instrumentet og derater transformeren ud fra kurve[10] aflæsning.



Den gennemsnitlige k-faktor for de 3 faser er $\frac{2,63+2,78+2,79}{3} = 2,73$

Man kan også beregne k-faktoren, men det kræver at man deler indholdet af harmonisk strøm op i de forskellige overtoner.

Jeg vil forsøge at ramme samme k-factor ved beregning. Men dette er kun for L1 (2,63) og kun fra 1.-3.-5.-7. og 11. harmoniske da jeg ikke kan udlæse resten og de lige harmoniske er så små at de er ubetydelige.

$$K = \frac{\sum_{H=1}^{H=11}(I_H \cdot H)^2}{\sum_{H=1}^{H=11} I_H^2} = \frac{(146 \cdot 1 \cdot 1)^2 + (146 \cdot 0,176 \cdot 3)^2 + (146 \cdot 0,0259 \cdot 5)^2 + (146 \cdot 0,0163 \cdot 7)^2 + (146 \cdot 0,0671 \cdot 9)^2 + (146 \cdot 0,0665 \cdot 11)}{(146 \cdot 1)^2 + (146 \cdot 0,176)^2 + (146 \cdot 0,0259)^2 + (146 \cdot 0,0163)^2 + (146 \cdot 0,0671)^2 + (146 \cdot 0,0665)^2} = 2,12$$

THD % 20,72
Order 1 100
Order 3 17,6
Order 5 2,59
Order 7 1,63
Order 9 6,71
Order 11 6,65

Som forventet er min beregnede k-faktor lidt mindre da jeg ikke har alle overtoner op til 49. med. Ifølge kurven skal transformeren med denne metode derates til ca. 90%.
Man kan købe såkaldte k-ratede transformere, disse fjerner ikke harmonisk forvrængning, men er bygget til at kunne modstå dem.

[10] ANSI/IEEE C57.110.

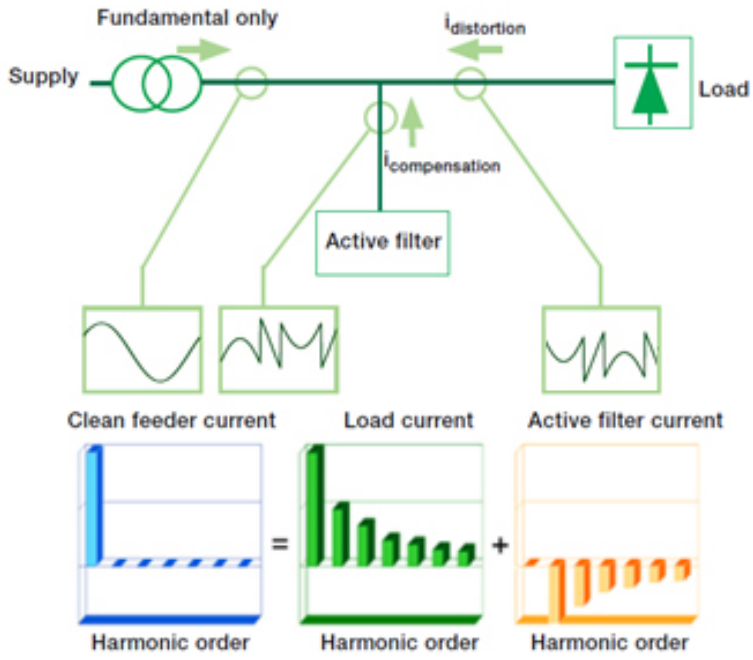
Metoder til at fjerne harmoniske overtoner

Man kan enten investere i brugsgenstande der producerer mindre harmoniske overtoner, reducere dem ved at installere et aktivt filter eller helt fjerne dem ved at installere skilletransformere med zigzag kobling.

Ved at fjerne de harmoniske overtoner reducerer man også RMS strømmen, da den er summen af grundtonen og alle overtonerne. På den måde er der en direkte økonomisk gevinst, da man sænker strømforbruget og effekttabet. Den indirekte gevinst ligger i at motor og andet udstyr holder længere og derved ikke kræver udskiftning lige så ofte og ikke er skyld i driftstop og tabt indtjening.

Aktivt harmonisk filter

Et aktivt harmonisk filter fungerer ved at det konstant analyserer strømmen og sender en modsat rettet harmonisk strøm ud i systemet, som ophæver de harmoniske overtoner. Det følger altså dynamisk forbruget og tilpasses. (tegning er lånt fra ABBs præsentation om aktive filtre)

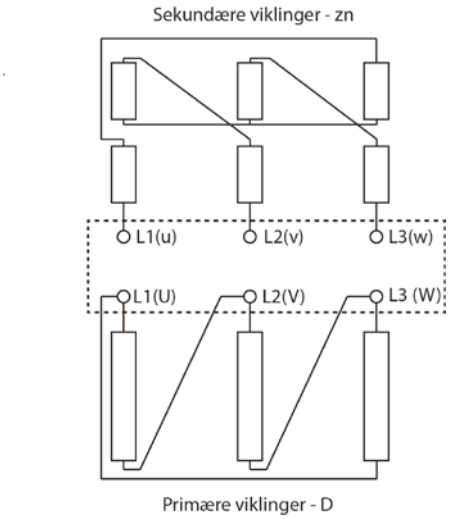


Det aktive filter monteres parallelt over forsyning. Det skal dog bemærkes at jo højere frekvens overtoner har, jo mere effekt kræver det at fjerne dem. Derfor fjerner man i praksis ikke alle de harmoniske overtoner, man reducerer de harmoniske der skaber problemer i installationen, til et acceptabelt niveau.

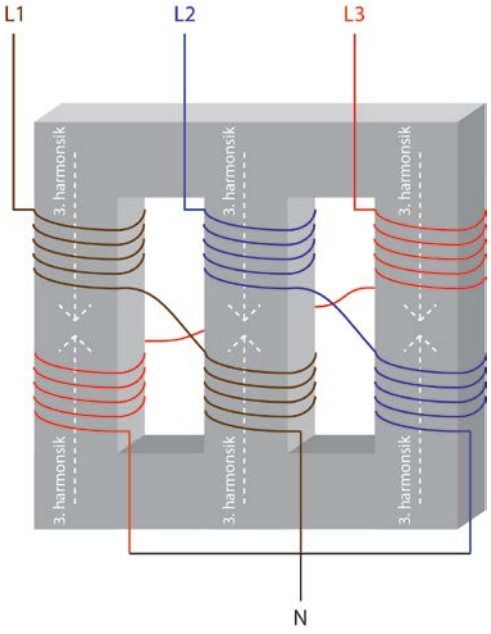
En anden fordel ved aktive filtre er at de også skaber modsatrettet reaktiv strøm og derved retter φ op. Både ved induktiv og kapacitiv φ.

Harmonic Mitigating Transformers (HMT – Zigzag koblede transformere)

En HMT er en transformer der er koblet i trekant på primær siden og zigzag på sekundær siden.



En enkelt installeret z-koblet transformer fjerner alle ulige harmoniske overtoner i den tidligere omtalte gruppe A, altså alle de ovetoner der opsummeres i nullen. Det gør den fordi at alle de f.eks. 3. harmoniske ligger i fase med hinanden, men modsatrettede i de forskellige faser. Når man vikler 2 forskellige faser omkring den samme jernkerne, ophæver magnetfelterne hinanden (electromagnetic flux cancellation):



Flere installerede z-koblede transformere med forskellige koblings cifre fjerner tilsammen, også de resterende ulige harmoniske overtoner[11]. På den måde kan man f.eks. i et kontorhus lade de forskellige etager, være forsynet fra hver deres Dzn0 og Dzn11 transformere og på den måde eliminere alle ulige harmoniske overtoner.

[11] GE Energy - GE Ultra Efficient Harmonic Mitigating Transformer - FAQ

Konklusion

I en moderne kontorbygning har strømmen et højt harmonisk indhold. Selvom der ikke er tilsluttet store servere og kæmpe ventilationsanlæg. Kilderne til det harmoniske indhold er primært computere og HF-koblinger. Så længe installationen er tilsluttet et stærkt net, har det kun meget lidt indflydelse på spændingskvalitet. Der vil dog være forhøjet effekttab i installationen og motorer.

Aktive filtre eller HMT'ere kan bruges til at forhindre at de harmoniske overtoner forplanter sig i andre aftageres installationer.

Kilder

- NKT - teknisk katalog
- ABB SACE – Electrical Installation handbook volume 2
- Siemens vejledning for SIMARIS Design software
- DEFU Rekommandation 16
- ANSI/IEEE C57.110
- GE Energy - GE Ultra Efficient Harmonic Mitigating Transformer – FAQ
- EATON – Energy Saving Through Harmonic Mitigation
- ABB – Powerpoint foredrag
- Stærkstrømsbekendtgørelsen Afsnit 6

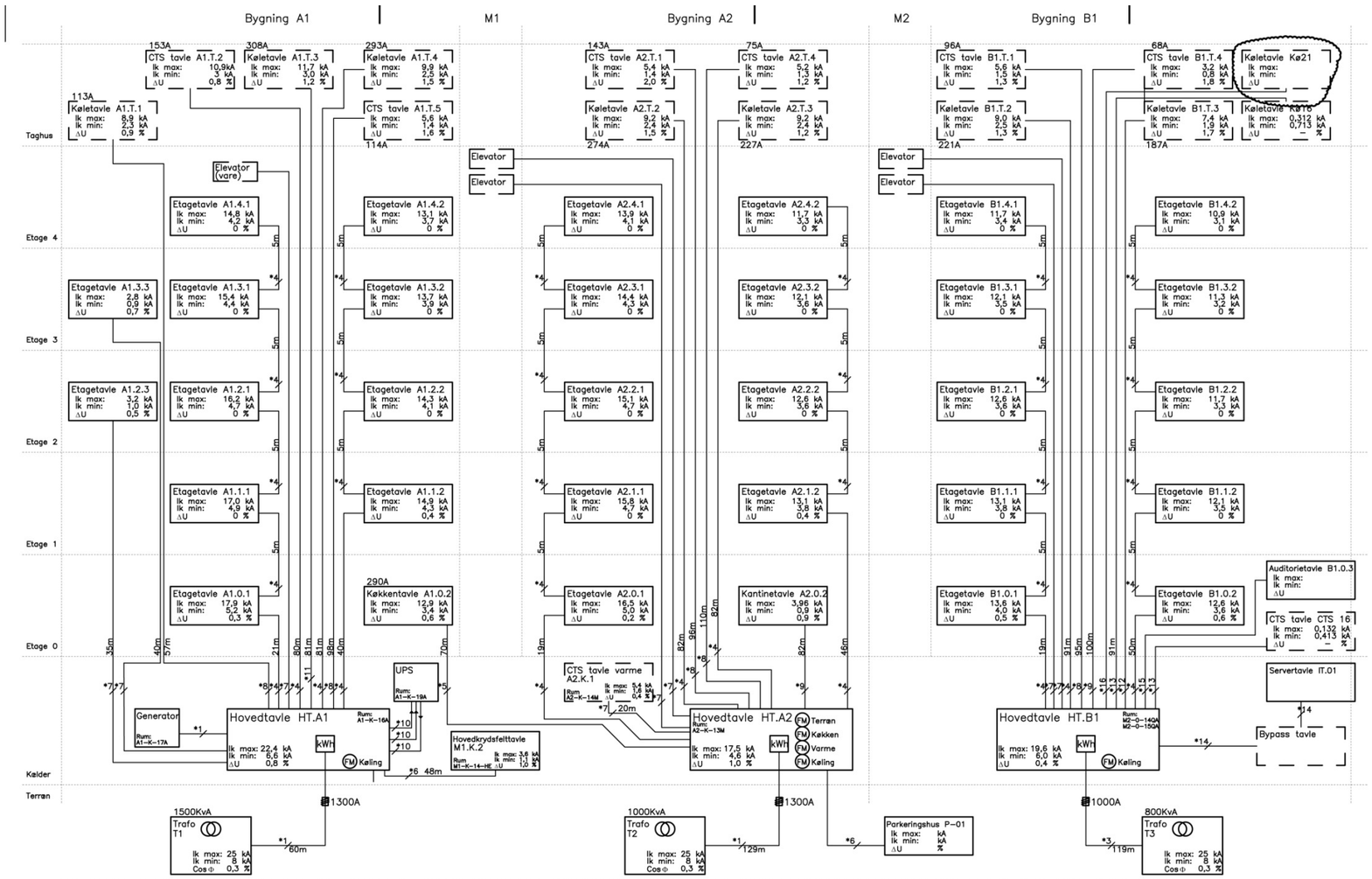
Bilag

BILLAG 1 – UDLÆSNING FRA FLUKE LOGNING 26

BILAG 2 – HOVEDLEDNINGSDIAGRAM NCC 27

Billag 1 – Udlæsning fra Fluke Power Log

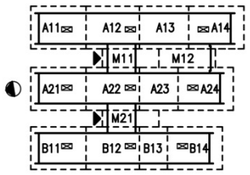
Function	L1N(V) / L1(A) Avg	L1N(V) / L1(A) Max	L2N(V) / L2(A) Min	L2N(V) / L2(A) Avg	L2N(V) / L2(A) Max	L3N(V) / L3(A) Min	L3N(V) / L3(A) Avg	L3N(V) / L3(A) Max	LNG(V) / N(A) Min	LNG(V) / N(A) Avg	LNG(V) / N(A) Max	Total Min	Total Avg	Total Max
Voltage	235,14 V	235,56 V	234,31 V	234,86 V	235,4 V	235,31 V	235,81 V	236,42 V	0,04 V	0,05 V	0,05 V			
Current	0,155 kA	0,173 kA	0,129 kA	0,141 kA	0,162 kA	0,143 kA	0,155 kA	0,171 kA	0,079 kA	0,083 kA	0,086 kA			
Peak Voltage	331,7 V	332,4 V	330,9 V	331,8 V	332,6 V	332,8 V	333,7 V	334,5 V	0,1 V	0,1 V	0,2 V			
Peak Current	260 A	286 A	216 A	234 A	264 A	246 A	264 A	290 A	136 A	152 A	174 A			
Crest Factor Voltage	1,41	1,41	1,41	1,41	1,42	1,41	1,41	1,42	327,67	327,67	327,67			
Crest Factor Current	0,002 k	0,002 k	0,002 k	0,002 k	0,002 k	0,002 k	0,002 k	0,002 k	0,002 k	0,002 k	0,002 k			
Half Cycle Current	155 A	174 A	128 A	141 A	165 A	143 A	155 A	173 A	78 A	83 A	87 A			
Active Power	35,09 kW	39,527 kW	28,838 kW	31,46 kW	36,502 kW	31,662 kW	34,485 kW	38,518 kW				93,977 kW	101,035 kW	109,908 kW
Apparent Power	36,3 kVA	40,535 kVA	30,25 kVA	33,073 kVA	37,913 kVA	33,88 kVA	36,502 kVA	40,333 kVA				99,422 kVA	105,875 kVA	114,547 kVA
Reactive Power	-9,68 kvar	-8,268 kvar	-10,487 kvar	-10,083 kvar	-9,277 kvar	-12,503 kvar	-12,1 kvar	-11,293 kvar				-32,872 kvar	-31,662 kvar	-29,847 kvar
Power Factor	0,96	0,98	0,94	0,95	0,96	0,93	0,94	0,96				0,94	0,95	0,96
DPF	0,98	0,99	0,97	0,97	0,98	0,96	0,96	0,97				0,97	0,97	0,98
Frequency												49,966 Hz	49,99 Hz	50,021 Hz
K-Factor A	2,63V	2,79V	2,4V	2,78V	3,07V	2,41V	2,79V	3,03V	19,11V	20,04V	20,74V			
THD V	2,4%	2,52%	2,47%	2,55%	2,69%	2,43%	2,5%	2,62%	175,01%	193,24%	231,41%			
THD A	20,72%	21,94%	18,68%	21,69%	23,41%	19,33%	21,99%	23,68%	327,67%	327,67%	327,67%			
THD W	0,09%	0,11%	0,1%	0,12%	0,15%	0,06%	0,08%	0,11%						
Plt	0,133			0,16			0,136							
Pst	0,095			0,124			0,1							
Unbalance Vn												0,11%	0,17%	0,24%
Unbalance Vz												0,04%	0,1%	0,2%
Unbalance An												1,02%	5,97%	10,04%
Unbalance Az												0,12%	2,09%	5,48%



Tegn.nr.:
T-E-1-X-7-310F

Tegn.tekst:
Hovedledningdiagram

Funda. Kælder Stue 1. sal 2. sal 3. sal 4. sal Tag



Byggesag:
Nyt domicil til NNIT
Østmarken 3, 2860 Søborg
Matr. Nr.: 14y Gladsaxe, 7m og 7o Mørkhøj

Bygherre:
NCC Property Development A/S
Tuborg Havnevej 15, 2900 Hellerup

Note:

Modelfiler:

Kø for serverrum påført

F	23-11-2011	DSB	RHO

Tavler tilføjet

E	11-10-2011	DSB	RHO

Ændring omfatter

Rev.:	Dato:	Tegn.:	Godk.:
Konst.: MLA	Tegn.: DSB	Godk.: RHO	
Skala: 1:–	Dato 27-09-2010		
Sagsnr.: 28310061			
Sagsnavn: NNIT			

NCC Totalentreprenør
NCC Construction Danmark A/S
Tuborg Havnevej 15
2900 Hellerup

DESI GN GR OUP ARCHITECTS

○	ARKITEKT	DESIGNGROUP ARCHITECTS
○	KONSTRUKTION	NCC Construction Danmark A/S
○	VVS-INSTAL.	NCC Construction Danmark A/S
●	EL-INSTAL.	NCC Construction Danmark A/S