

Mätningar och undersökning av elkvaliteten i elnätet på reningsverket GRYAAB, i Göteborg

Measurements of the power quality in the power network at the water sewage plant, GRYAAB in Gothenburg

MONICA VEA PETERSSON

Examensarbete

Civilingenjörsprogrammet för elektroteknik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Institution för Energi och miljö

Examinator: Torbjörn Thiringer

Göteborg 2008-10-03

Abstract

On a request from the water sewage plant Gryaab in Gothenburg a power quality survey was performed. The voltages and currents have continuously been sampled in the incoming 10 kV substation HSP01 from April-August 2008. Power quality measurements were also performed in Gryaab's other 10 kV substation HSP04 fed from HSP01 and at the terminals of the induction motor IN_PU4040 of 1.3 MW which controls one of the four large inflow pumps to the plant. The reason for the latter measurement was due to registered negative transients each time the motor was connected to the grid. The cause of the transients could be explained by the coupling in the substation, the ageing of the motor which could result in damage of the bearings or resonance in the motor circuit which amplifies high frequency harmonics. During the survey 58 transients were registered, of which 56 were caused from the coupling of IN_PU4040 in HSP01. The additional two transients could not be explained by any event at Gryaab. Two transients occurred during the measurements in HSP04. A comparison between the breaker actions in the substation HSP01 showed that these transients were caused by the breakers on the outgoing lines to the induction motor IN_PU2040 and IN_PU3040 respectively. Due to the fact that these two breaker actions never caused transients in HSP01, there are reasons to believe that the transients caused by the breaker actions are amplified in the substation HSP04. Twenty-one voltage dips occurred during the measurements, of which four had a retained voltage between 60 % - 75 % and a duration of 100 ms to 200 ms. These dips tripped the frequency converters, motors and active filters on the low voltage side of HSP04. A comparison between the measurement data at Gryaab and Gothenburg Energy's measurement data at the feeding 10 kV station in Repesäll, shows that all of the dips below 90 % at Gryaab are caused by faults on higher voltage levels than 10kV. According to Gothenburg Energy mostly of the dips are caused by faults at 130 kV and upwards. In order to mitigate the effects of the voltage dips on the frequency converters, motors and filter at the low voltage side of HSP04 a dynamic voltage stabiliser (DVR) can be installed. But at this moment this cannot be recommended because of the low cost effectiveness. The DVR can compensate voltage sags, swells, voltage unbalance, phase angle jumps. All of the measured data from individual harmonics, THD, frequency variations and voltage unbalance fulfils the requirements set by the European EMC standard EN61000-2-12 with a large margin. The prominent individual harmonics measured in HSP01 and HSP04 are equally distributed, these are the 5th, 7th, 11th and the 13th harmonic.

Sammanfattning

På uppdrag av reningsverket Gryaab i Göteborg har elkvaliteten studerats i anläggningen. Spänning och ström har samplats kontinuerligt i inkommande 10kV centralställverk under drygt tre månader mellan april och augusti 2008. Mätningar har även gjorts i biobäddens 10 kV ställverk (HSP04) samt på induktionsmotorn med märkeffekten 1.3 MW som styr en av de fyra inloppspumparna IN_PU4040. Mätningar på induktionsmotorn genomfördes efter upptäckten att en negativ spänningstransient inträffade varje gång brytaren i 10 kV ställverket slog till. Vad som orsakar transienten kan bero på flera faktorer såsom effektbrytaren i ställverket, motorns ålder och potentiella lagerfel samt resonans i motorkretsen som förstärker vissa högfrekventa övertoner. Utav 58 registrerade spänningstransienter i HSP01, genereras 56 i samband med tillkopplingen av induktionsmotorn IN_PU4040. De resterande två transienterna kan inte kopplas till någon händelse på Gryaab. Två transienter registrerades under mätningen i HSP04. De kunde knytas till omkopplingarna av IN_PU2040 respektive IN_PU3040 i HSP01. Det betyder att det elektriska avståndet är litet mellan HSP04 och HSP01 eftersom transienter endast lever kvar en kort stund. Tjugoen spänningsdippar inträffade under mätningen varav fyra hade en kvarvarande spänning på 60 % - 75 % och varaktighet mellan 100-200 ms. Dessa fyra dipparna trippade motorer, aktiva filter och frekvensomriktare i HSP04. En jämförelse mellan Gryaab's mätdata och spänningsdipparna registrerade av Göteborg energis mätenhet i ställverket K6 Repesäll, visar att alla dipparna under 90 % genereras på högre spänningsnivåer än 10 kV. Troligen orsakas flertalet dipparna av fel på 130 kV sidan. En åtgärd som kan göras för att undvika trippandet av frekvensomriktarna och det aktiva filtret i biobäddens laster är att installera en dynamisk spänningsstabilisator. Den kan se ut på lite olika sätt t.ex. med full kompensering för 3-fas spänningsänkningar ända ner 70 %, korrigerig för spänningsobalans samt för fel i fasvinkeln. Sådana installationer är för närvarande inte att rekommendera p.g.a. dess stora platsbehov och höga kostnad. Individuella övertoner, THD, frekvensvariationer och spänningsobalans understiger gränsvärden satta i EMC europastandarden EN 61000-2-12 med god marginal. De framträdande övertonerna i HSP01 och i HSP04 är de samma, dessa är 5:e, 7:e och 11:e, och 13:e övertonen.

1	Inledning	6
1.1	Bakgrund	6
1.2	Syfte	6
1.3	Avgränsning	7
2	Definition av elkvalitet	8
2.1	Bra eller dålig elkvalitet?	8
2.1.1	Hur åstadkommer man en god elkvalitet?	9
2.2	Händelser och variationer	9
2.3	EMC	10
2.3.1	Magnetfält	12
2.3.2	Elektriska fält	13
2.4	Korta spänningsvariationer	14
2.4.1	Spänningsdipp och avbrott	14
2.4.2	Fasförskjutning i samband med balanserade spänningsdippar	15
2.4.3	Skyddets bryttid påverkar dippens varaktighet	16
2.4.4	Obalanserade fel	16
2.4.5	Spänningsobalans	17
2.4.6	Transformatorns inverkan på spänningsdipparns karaktäristik	17
2.4.7	Åtgärder för att reducera effekten av spänningsdippar och korta avbrott	19
2.5	Transienter	19
2.5.1	Transienters ursprung	20
2.5.2	Konsekvenser av transienter	21
2.5.3	Åtgärder för reducering av transienter	22
2.6	Övertoner	22
2.6.1	Beskrivning av övertoners analysmetoder	23
2.6.2	Formfaktor	26
2.6.3	Övertonernas karaktär	26
2.6.4	Symmetriska övertoner	27
2.6.5	Resonans	27
2.6.6	Övertonernas påverkan	28
2.6.7	Åtgärder för att reducera övertoner	29
2.7	Flimmar	29
2.7.1	Mätning av flimmar	30
2.7.2	Flimmereffekt	31
2.7.3	Åtgärder för att reducera flimmar	32
3	Induktionsmotorer och varvtalsstyrning	33
4	Elkvalitetsmätning	36
4.1	Mätmetod och analysverktyg	37
4.1.1	PQ Secure	39
4.1.2	PQ Online	40
4.2	Standarder och mätnoggrannhet	40
4.2.1	Samplingsfrekvens	41
5	Resultat från elkvalitetsmätningen	42
5.1	Mätningar och analys från HSP04	56
6	Mätning av jordtag och jordresistans	62
7	Diskussion och slutsatser	63

8	<i>Fortsatta studier</i>	65
9	<i>Källförteckning</i>	66
10	<i>Bilaga</i>	68
	<i>10.1 Registrerade spänningsdippar hos Gryaab och Göteborg energi</i>	68
	<i>10.2 Spänningsstabilisatorer</i>	68
	10.2.1 Unitrafo spänningsstabilisator	68
	10.2.2 ABB:s spänningsstabilisatorer	70
	<i>10.3 Planritning över Gryaab med jordkabel i mark</i>	72
	<i>10.4 Standard EN 61000-2-12</i>	73
	<i>10.5 Teknisk beskrivning av Unipowers mätinstrument</i>	74

1 Inledning

Gryaab är Göteborgs kommuns reningsverk tillsammans med gränsliggande kommuner. Reningsverket har flera komplexa processer med pumpar som drivs av induktionsmotorer i olika storlekar. Ett flertal motorer drivs med hjälp av frekvensomriktare som är känsliga för spänningsvariationer. Omriktarna är också en generator av högfrekventa störningar. Störningarna leds ut på elnätet där det kan påverka annan utrustning. För att få en klar bild över vilka de främsta störkällorna är samt vilken typ av störningar som dominerar och påverkar lasterna på Ryaverket, är det intressant att genomföra en mätning av el-kvaliteten i anläggningen. Ett mätinstrument som samplar spänning och ström installerades i inkommande 10,5 kV centralställverk för att inkludera hela anläggningen i studien. I analysen användes främst datorprogrammet PQSecure framtaget av mätapparaters tillverkare Unipower. Utifrån samplade mätvärden på spänning och ström plockar PQSecure fram elkvalitetsparametrar, såsom spänningsdippar, transienter, flimmer och THD genom matematiska algoritmer satta av europastandarder. En mindre studie över hur jordningen ser ut på verket har gjorts för att få en uppfattning om hur bra transienter kan fortplanta sig i nätet.

1.1 Bakgrund

Historisk sätt har elkvalitet alltid varit viktig. Störningsbilden har däremot förändrats genom åren eftersom elnätet och dess laster har haft ett ökande innehåll av kraftelektronik baserad utrustning. Apparater och utrustning skickar i allt högre utsträckning ut störningar samtidigt som utrustningen själv ökar i störkänslighet. Det gäller även på Gryaab i Göteborg. Reningsverket upplever problem under sommarhalvåret med att åskan orsakar spänningssänkningar samt att elektronik och kommunikationssystem vid enstaka tillfällen har upplevt störningar. Belysningsarmaturer med högfrekvent tänding har på sikt demonterats, särskilt i centralbyggnaden, eftersom de antingen inte fungerat som avsedd eller har fallerat efter kort tid. Det finns ett stort antal frekvensomriktare på Gryaab. De flesta upplever inga driftstörningar vid spänningssänkningar. Det gäller inte verkets största omriktare och motordrifter med märkeffekter på 90-200kW som är matade från biobäddanläggningens 10 kV ställverk, HSP04. Omriktarna trippar ett antal gånger per år och mest frekvent under sensommaren och hösten. Gryaab har tidigare mätt övertonshalten i just biobäddsställverket och konstaterat att övertonshalten har överskridit normens gränsvärden. Till följd av detta installerades aktiva filter år 2004 på två 10,5/0,4 kV transformatorers lågspänningssida. När tillräckligt djupa spänningssänkningar inträffar trippar ofta de aktiva filtren vid samma tillfällen då frekvensomriktarna trippar. Drosslarna i filtren har vid flera tillfällen bytts då de fallerat p.g.a. störningar.

Efter att ha kommit i kontakt med Unipower, elkvalitetsmätarens tillverkare, installerades deras mätare UP2210 i Gryaab centralställverk.

1.2 Syfte

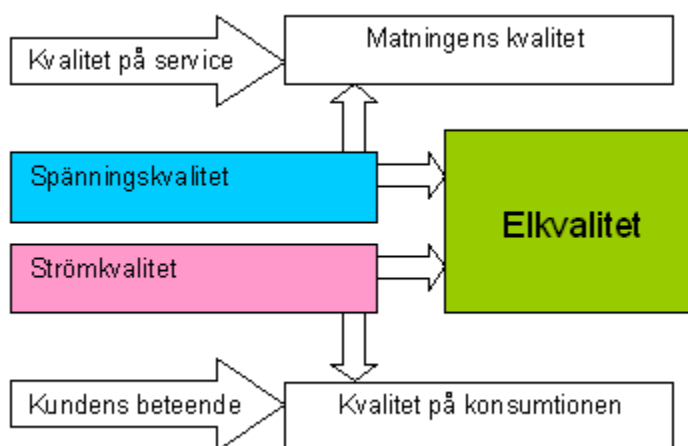
Målet med arbetet är att undersöka hur Gryaab elkvalitet ser ut, hur möjliga störningar kan fortplanta sig och undersöka varifrån störningarna kommer ifrån. Det är relevant att undersöka åtgärdsalternativ ifall det behövs.

1.3 Avgränsning

Elkvaliteten har endast undersökts på frekvenser under 2,5 kHz. Det betyder att högfrekventa störningar, både ledningsbundna och icke ledningsbundna störningar ej har kunnat upptäckas. Eftersom mäthenheten har varit beroende av plintars tillgänglighet har valet av mätpunkter varit begränsat.

2 Definition av elkvalitet

Elkvalitet kan definieras som en kombination av spänningskvalitet och strömqualität och innefattar spänningens/strömmens avvikelser från det ideella värdet. Enkelt förklarat, är det ideella utseendet på elen, en sinusformad kurva, med konstant amplitud och frekvens. Både frekvens och amplitud är lika med det nominella värdet. Vilken som helst avvikelse från det ideella utseendet, är en elkvalitetsstörning. En störning kan antingen vara en spänningsstörning eller strömstörning, men det kan inte alltid urskiljas, eftersom en spänningsförändring alltid vill resultera i en strömförändring och tvärt om. Det finns däremot observationer som kan göras för att skilja åt störningens ursprung. Spänningsstörningar bildas i elnätet och påverkar kunderna medan strömstörningar bildas hos kunden och påverkar därmed elnätet. Klassificeringen har gjorts utifrån om ett fel uppstår: t.ex. starten av en stor motor leder till överström. Sätt från nätets sida är detta en tydlig strömstörning. Den resulterande spänningssänkningen är däremot en spänningsstörning för närliggande kunder [1]. En översikt över tolkningen illustreras i figur 2.1.



Figur 2.1 Det finns vissa krav och förväntningar på att kundens matningsspänning är av god kvalitet, men kraven riktas även på kunden som kan påverka elkvaliteten genom sitt sätt att förbruka strömmen.

Elkvalitetsstörningarna kan delas in i ett antal olika fenomen: avbrott, verkningsgrad, övertoner, osymmetri, spänningsvariationer såsom transienter, spänningssänkningar och flimmar. Vissa fenomen skapas då elen används, t.ex. genererar olinjära laster övertoner, omkopplingar i nätet eller inkoppling av stora laster ger spänningsvariationer. Fenomen som orsakas av oförutsedda händelser som t.ex. åska ger kraftiga transienter eller spänningssänkningar som i sin tur kan förorsaka avbrott [2].

2.1 Bra eller dålig elkvalitet?

Om elkvaliteten är bra eller dålig är en subjektiv uppfattning om upplevda eller förväntade egenskaper hos en vara eller tjänst. Den bestäms av känslor och fördomar som vi får från omgivningen. Eftersom omgivningen förändras, förändras även vår måttstock i bedömningen av god elkvalitet. Kraven för god elkvalitet har ökat genom åren i samma takt som kostnaden för ett avbrott eller en störning har ökat [2]. I värsta fall kan kostnaden för avbrotten vara så avgörande att det påverkar företagets överlevnad. Gryaabns reningsverk har inte detsamma ekonomiska press som konkurrerande företag inom privat sektor, problemet ligger snarare i att

hantera spänningsdippar och avbrott på ett överkomligt sätt. Gränsen för hur länge Gryaab kan vara utan el ligger på drygt ett dygn under torra perioder, medan under regniga perioder kan gränsen gå vid endast några timmar. Elnätet har dock hög redundans med både avbrottsfri kraft i form av 6 UPS batterier, en dieselgenerator samt reservkraft i form av 3 gasmotorer ifall elleveransen från Göteborg energi uteblir längre än ett dygn. Reservkraften tar däremot ett halvt dygn att starta upp, vilket kräver att den används vid större avbrott. I nödsituationer utan reservkraft kan avloppsvattnet ledas direkt ut i havet utan rening.

2.1.1 Hur åstadkommer man en god elkvalitet?

Att åstadkomma en god elkvalitet är ett samarbete mellan nätägare, leverantörer av apparatur, elanvändare och standardiseringsgrupper. En CE märkt apparat har genomgått ett antal specifika test för att säkerställa kompatibilitet med kringliggande utrustning. Detta visar att apparaten varken stör eller störs i det elnät som denna ansluts till.

EU utfärdat ett EMC direktiv som skall säkerställa att en apparat fungerar korrekt i en miljö med elektromagnetisk inverkan samt att den inte verkar störande på densamma. De satta gränserna för apparatens immunitet mot störningar samt emission av störningar, är satta av olika branschorganisationer som godkänts av EU kommissionen. Det gör de till en Europainorm, vilket är påtvingat inom EU.

Enligt gällande EMC-krav skall en apparat konstrueras för att uppfylla krav på emission och immunitet. Kraven på emission är att apparaten inte avger mer störande elektriska signaler än vad som tillåter kringliggande utrustning att fungera som avsett. Immunitet i sin tur innebär att apparaten är så pass tålig mot störningar att den fungerar som avsett tillsammans med kringliggande utrustning. Dock stämmer detta inte alltid med verkligheten. En godkänd maskin, t.ex. frekvensomriktare, kan förorsaka problem i en anläggning. Frekvensomriktaren ifråga är enbart en apparat av många som skall fungera ihop med resten av utrustningen vilket kräver att installation av dessa utförs på det sätt som anges av leverantören.

2.2 Händelser och variationer

En viktig skillnad på störningar brukar göras mellan händelser och variationer. Variationer innebär störningar i stationärt tillstånd eller störningar i delvis stationärt tillstånd. Det är då möjligt med fortlöpande mätningar. Spänningsvariationer i stationärt tillstånd är vanligen små avvikelser från det nominella spänningsvärdet.

Händelser är plötsliga störningar med en tydlig början och ett slut. Mätningen av variationer, görs utifrån energi konsumtion, medan mätningen utav händelser, liknar funktionen hos ett skyddsrelä, överskrider parametern ett givet värde så kopplas de ur [1]. Här är ett exempel på skillnaderna mellan händelser och variationer anknutna till ström kvaliteten, se Figur 2.2.

Tabell I: Definitioner på händelser och variationer samt bakomliggande orsak till störningen

	Orsaker	Benämning
Händelser	Start av stora laster t.ex. induktionsmotorer, stora likriktare	Transient överström
	Fel på kundens premisser	Spänningsdipp som fortplantar sig
Variationer	Snabba variationer i lasten	Periodiska spänningsvariationer som orsakar ljus flimrar
	Normal variation i lasten	Överström, Över- / underspänning
	Normal variation i effekten	frekvensvariationer

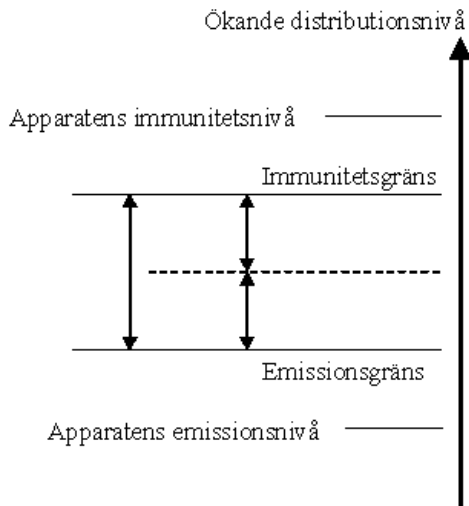
2.3 EMC

EMC är ett brett begrepp och ett samlingsord för elektromagnetisk kompatibilitet. Det kan uttydas som elektriska apparaters samexistensförmåga, d.v.s. deras förmåga att verka utan att påverka eller påverkas av den elektromagnetiska miljön. EMC berör två grundläggande begrepp, emission och immunitet, d.v.s. störgenerering respektive störtålighet [3].

Elektriska enheter kan alltså både agera som elektromagnetiska störningskällor då de genererar störningar och/eller så agerar de som mottagare av störningar. Störningarna kan, beroende på frekvens och fältbild bäras genom luften, isolatorer, ledas genom metalltrådar, kablar och ledare. Allt som har en viss konduktivitet har en viss förmåga att leda ström. Elkvalitet och EMC är två begrepp som kan knytas ihop på många sätt eftersom elkvaliteten blir sämre om EMC är dålig. När elkvaliteten sänks kan apparater med godkända EMC krav uppleva störningar utifrån.

Ledningsbundna EM störningar innebär att apparater direktkopplade till samma nät som störkällan kan motta störningarna. *De icke ledningsbundna* störningarna når el-utrustningen direkt via elektromagnetiska fält utstrålade från utrustningen och/eller kablage i närheten [1]. De kan även induceras i ledningar och på så sätt nå el-utrustningen via elnätet.

En elektromagnetisk störning kan beskrivas som en oönskad signal som kan leda till en apparats försämrade prestanda. Den försämrade prestandan blir i sig då en EM störning. Följaktligen så är EM störningen orsaken, men effekten blir en störning i form utav försämrad prestanda. Genom att introducera begreppet kompatibilitetsnivå kan ett ramverk formis för hur en apparat bör testas och förbättras. För varje EM störning definieras en kompatibilitetsnivå som är ett referensvärde som används för att jämföra emission och immunitet [1]. Gränsvärdet för immuniteten är högre än för kompatibiliteten. Emissionsnivån är däremot lägre eller lika med kompatibilitetsnivån, se figur 2.3.



Figur 2.3 Nivåer, gränser och marginaler uppsatta i EMC standarder

Utrustningens testande involverar jämförelse av apparatens producerade störningar med emissionsgränsen och den maximala störningsnivån som apparaten upplever under normal drift, med viss immunitetsnivå. För att klara testet skall emissionsnivån vara lägre än emissionsgränsen, och immunitetsnivån skall vara högre än immunitetsgränsen. Utifrån detta resonemang kan man dra slutsatsen att marginalen mellan immunitetsnivån och emissionsnivån inte är särskilt stor. Detta hade stämt bra om testerna kunde reproducera alla möjliga driftfall för alla typer av apparater. I verkligheten genomförs testerna i strängt definierade laborieförhållanden, så kallade typtester [1]. Om apparaterna klarar sig genom testerna, passerar alla andra apparater också testerna och får sin tillhörande märkning. Det kan därför vara av intresse att studera apparaterna i den miljö som den befinner sig i under drift.

Nedan följer en lista på ledningsbundna EM-störningar enligt den internationella standarden IEC 61000-2-5.

- Övertoner
- Signal spänningar
- Spännings variationer (Enligt SS.EN 50 150 är $\Delta V_{Max} = 8\%$ för lågspänningsnät)
- Spänningsdippar och avbrott
- Obalans i spänningen
- Variationer i nät frekvens
- Inducerad lågfrekvent spänning
- DC i AC nätverk
- Inducerad (högfrekvent) kontinuerlig spänning eller ström
- Enkelriktade transienter
- Oscillerande transienter

De elektromagnetiska störningarna kan grupperas in i olika frekvensområden som visas i tabellen nedan.

Tabell II klassifiering av frekvensområden

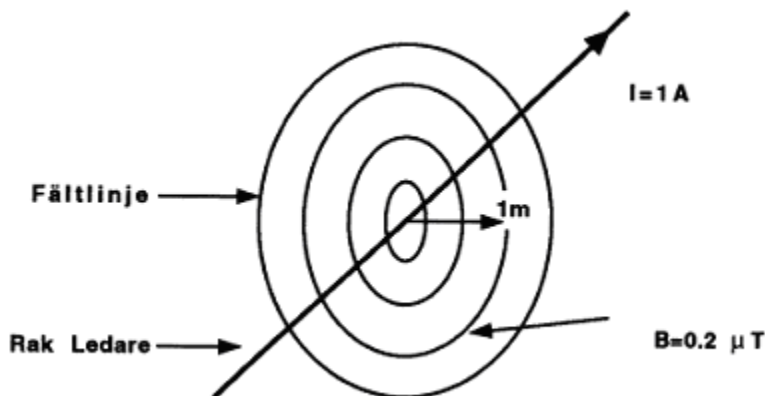
Frekvens	Störningsform
50Hz – 9kHz	Ledningsbundna störningar
9kHz – 2GHz	EMI=electromagnetic interference (Ledningsbundna störningar och icke ledningsbundna störningar)
10MHz-30MHz	RFI =Radio Frequency Interference (icke ledningsbundna störningar)

I frekvensområdet 50Hz-2,5 kHz mäts elkvaliteten vid inkommande matning till Gryaab. De elektromagnetiska störningarna EMI ligger mellan frekvenserna 9kHz till ca 2GHz och innefattar både ledningsbundna störningar samt icke ledningsbundna störningar. EMI refereras ofta till som brus. Bruset kan vara externt från en yttre källa eller internt, skapad av enheten själv. De luftburna störningarna RFI (Radio frequency interference) finns i frekvensområdet 10MHz upp till 30MHz. Det ingick inte i studien att analysera RFI på Gryaab. Ju högre frekvens som skall mätas, desto mer komplexa och avancerade blir mätningarna, samt mätutrustningen.

2.3.1 Magnetfält

Ström alstrar magnetfält vilket betyder att kablage, motorer och elektriska apparater omges av magnetfält. På grund av olinjära laster i elnätet har grundtonen hos växelströmmen strömkomponenter i högre frekvenser överlagrade på sinusvågen. Det betyder att också magnetfältet existerar på ett antal frekvensnivåer.

Den magnetiska fältstyrkan avtar i förhållande till avståndet, r , som antingen är proportionell, kvadratisk eller upphöjd i 3 beroende på om strömkällan är en enfas ledning, punktkälla eller trefasledning [4], se figur 2.4. nedan.



Figur 2.4 En rak ledare alstrar magnetfält som avtar med avståndet, r , från ledaren

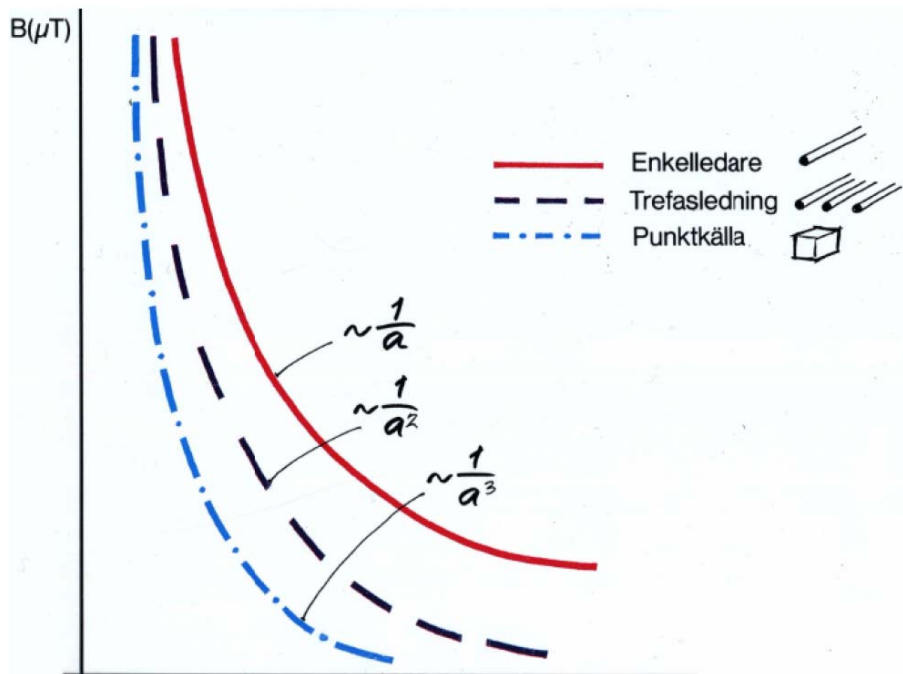
Det enklaste fallet är en rak ledare med avståndet r ut till fältstyrkan:

$$H(r) = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (1)$$

Den magnetiska flödestätheten blir då följande:

$$B(r) = \mu \cdot H(r) \quad (2)$$

Som nämnts tidigare så beror den magnetiska fältbilden på strömkällans form. I figuren nedan ser vi hur en punktkällas magnetfält avtar betydligt snabbare än hos en enkel ledare.



Figur 2..2.5 Magnetfältet avtar olika beroende på fältets källa. Magnetfältet från en enkel ledare avtar med ett genom avståndet a , medan en trefas lednings magnetfält avtar snabbare eftersom det avtar med ett genom avståndet upphöjt i tre.

Anledningen till att det totala magnetfältet kring trefasledaren är lägre än hos en enkelledare är att magnetfältets tre riktningar tar ut varandra.

2.3.2 Elektriska fält

Ett elektriskt fält alstras av en laddad partikel med laddningen q . Fältet beror även på dragningskraften som partiklarna upplever på grund av positivt eller negativt tecken på laddningen. Det behöver endast finnas en spänning för att ett elektriskt fält skall bildas.

$$E = \frac{F}{q} \quad (3)$$

2.4 Korta spänningsvariationer

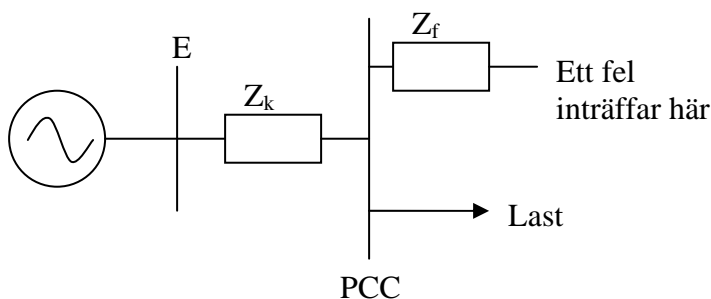
Lasternas effektförbrukning varierar med tiden som gör att spänningen i elnätet varierar då spänningen är direkt proportionell mot strömmen. Storleken på variationerna beror därför på hur stora ändringarna i effektförbrukningen är. Under tiden då en stor last stängs av eller startas upp kommer spänningen direkt att höjas respektive sänkas under en tid, innan den balanseras. Den reaktiva effekten är mycket avgörande för hur stor en spänningssänkning blir. För att uppnå stabila spänningsnivåer krävs ibland att den genererade reaktiva effekten kompenseras för. För att säkerställa en minsta gemensamma nämnare, har normer satts för tillåtna spänningsvariationer på +6V och -10V innan de klassas som någon annan typ av elkvalitetsproblem [5 3].

2.4.1 Spänningsdipp och avbrott

En spänningsdipp är en kortvarig reduktion i spänningens RMS värde. Spänningsdippen brukar klassas utifrån att reduktionen är mer än 10 % och att varaktigheten ligger mellan 10 ms till 1 s. Orsaken till spänningsdippar är oftast en plötslig ökning av strömmen i elsystemet som t.ex. kommer från en kortslutning, start av motor eller överlast. När en kortslutning uppstår, sänks spänningen till noll i kortslutningspunkten och närliggande laster upplever en spänningsdipp. Djupet på spänningssänkningen beror på det elektriska avståndet från kortslutningspunkten [5 6].

$$V_{Dipp} = \frac{Z_k}{Z_k + Z_f} E \quad (4)$$

I ekvation (4) är Z_k kortslutningsimpedansen mellan punkten PCC (point of common coupling) och felet, Z_k är källimpedansen från nätet fram till PCC och E är spänningens per unit värde d.v.s. $E = 1$ p.u under normaldrift. Från ekvationen finns ett tydligt samband mellan spänningsdippens ökande djuphet då lasten befinner sig elektrisk närmare kortslutningspunkten (När Z_f minskar) och för system med lägre felimpedans (När Z_k ökar) [5]. Notera att ovanstående modell är en enlinjemodell. I verklighetens 3-fas system gäller modellen endast för balanserade fel d.v.s. kortslutningar mellan alla tre faserna. För kortslutningsberäkningar i enfas och mellan två faser används en modifierad version av enlinjemodellen där både positiv följd, nollföljd och minusföljd tillämpas i beräkningarna, det beskrivs närmare i underkapitlet om obalans i spänningen.



Figur 2.6 Enlinjemodell över elnätet då ett fel inträffar. Z_k är källimpedansen, Z_f är impedansen mellan PCC och felet

Anledningen till det ökande intresset för spänningsdippar beror huvudsakligen på hur mycket problem de orsakar för reglerbara styrsystem (ex. mjukstart, frekvensomriktare mm), processkontrollutrustning, och datorer. Det finns utrustning som triggas när RMS spänningen sänks ner till 90 % för mer än en eller två perioder (20-40 ms) [1 5]. Uppenbarligen är inte följderna lika stora från en spänningsdipp i jämförelse med ett avbrott, men eftersom spänningsdipparna förekommer i allt högre utsträckning så skapar de större skada än avbrotten. De korta och de flesta långa avbrotten bildas i det lokala distributionsnätet. En spänningsdipp som förekommer i lastens matningspunkt kan däremot orsakas av en kortslutning i transmissionsnätet flera hundra kilometer därifrån. Därför är en spänningsdipp ett globalt problem i jämförelse med avbrott.

Typisk varaktighet för en spänningsdipp går från några millisekunder till några tiotals sekunder. Det existerar ett flertal metoder för att fastställa spänningsdippar, t.ex. från 50 Hz spänningen, eller toppspänningen från varje period eller halvperiod, men den absolut vanligaste metoden är genom sinuskurvans RMS spänning. Det har liten betydelse vilken metod som används så länge spänningen är sinusformad. Dock skiljer sig spänningen oftast från sinuskurvans utseende särskilt under förloppet av en spänningsdipp.

Eftersom spänningen mäts med avseende på tiden, där mätningarna görs ett antal gånger per period, kan RMS spänningen beräknas utifrån dessa mätpunkter [1 5].

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2} \quad (5)$$

N representerar antalet mätningar per period och v_i representerar den samplade spänningen med avseende på tid.

Experter inom området är stort sätt överens om att använda spänningens RMS värden är det mest optimala sättet att genomföra dippberäkningarna på och att det lägsta RMS värdet bestämmer spänningsdippens djuphet. Det förekommer däremot stora oenigheter när det gäller att kvantifiera storleken på spänningsdippen. Ett sätt att definiera spänningsdippar är att dividera kvarvarande RMS värdet i spänningsdippen med den nominella spänningen. Då erhålls ett procentvärde på hur mycket den kvarvarande spänningen är i jämförelse med den nominella spänningen [1 5]. Exempel på detta är då vi har ett 10 kV system med en spänningsdipp på 70 %. Då har spänningen sjunkit ner till 7 kV eftersom $\frac{7000}{10000} \cdot 100 = 70\%$.

Den här metoden rekommenderas i ett antal IEEE standarder och används i rapporten.

2.4.2 Fasförskjutning i samband med balanserade spänningsdippar

När spänningen sänks i ett elsystem kommer fasförskjutning att inträffa eftersom både ström och spänning är komplexa storheter som beror av amplitud och fasvinkel. De flesta apparater upplever inga problem med detta men det finns vissa omriktare med kraftelektronik som använder fasvinkeln i styrningen. Anledning till fasförskjutning under trefas fel beror på förhållandet mellan X och R mellan last och matning. Ytterligare en anledning till att fasförskjutning uppstår på spänningen beror på nertransformeringen av den 3-fasiga spänningsdippen [5].

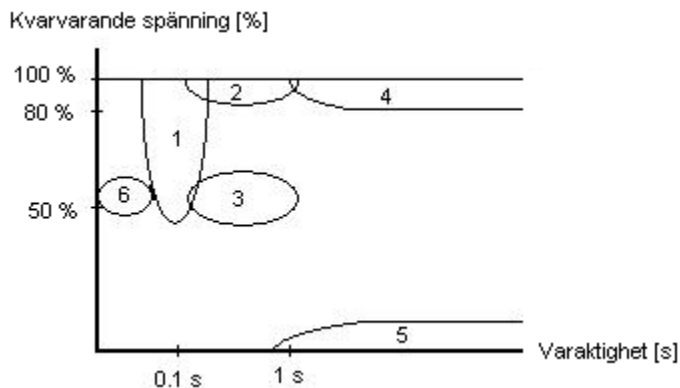
2.4.3 Skyddets bryartid påverkar dippens varaktighet

Spänningsdippens inträffande beror ibland på fel någonstans i elnätet. Idet skyddet har åtgärdat kortslutningen kan spänningen återgå till normalläge. Spänningsdippens tidsförlopp bestäms huvudsakligen av skyddets bortkopplingstid. Bortkopplingstiden består av relätid och bryartid. Relätiden är den tid det tar för reläet att inse att ett fel skall åtgärdas. Bryartiden är tiden det tar för brytaren att mekanisk bryta felet. En spänningsdipp kan ändå ha längre varaktighet än bortkopplingstiden om dypen registreras långt ifrån bortkopplingen. Det tar oftast längre tid att åtgärda en kortslutning i distributionsnätet än i transmissionsnätet eftersom den kritiska utlösningstiden är liten i transmissionsnätet, då krävs snabbare skydd [5]. På grund av selektiviteten i nätet är alltid relätiden närmast felet kortast, och ökar ju längre ifrån felet reläet sitter.

Som sagt så påverkas spänningsdippens varaktighet på var i elsystemet felet har inträffat.

Figur 2.7 presenterar spänningssänkningarnas varaktighet och djup, där numret anger var i elnätet felet inträffar.

1. Fel i transmissionsnätet
2. Kommunikerande fel i distributionsnätet
3. Lokala distributionsfel
4. Start av stora motorer
5. Korta avbrott
6. Säkringar



Figur 2.7 Spänningssänkningar vars djup och varaktighet bestäms utifrån var felet inträffar

2.4.4 Obalanserade fel

Analysen av spänningssänkningar ovan beskrev enfas modellen vid balanserade kortslutningar, det motsvaras i verkligheten av trefas fel där endast plusföljvärden beräknas. Med obalanserade fel menas alla andra typer av fel som kan inträffa i ett trefas system, t.ex. kortslutning mellan en fas och jord, mellan två faser eller mellan två faser och jord. Här används ekvivalenta scheman för respektive fel där positiv följd, negativ följd och nollföljd kopplas ihop till ett ekvivalent enlinjeschema där positiv följd innehåller spänningskällan. Spänningsdippens utformning och längd bestäms inte endast utav skyddets bortkopplingstid utan också utifrån

vilken typ av fel som inträffar [5]. Därför är det viktigt att kunna förutse och beräkna spänningsdippens utseende beroende på felets kategori.

2.4.5 Spänningsobalans

Obalans i spänningen beror på att fasernas laster drar olika mycket energi. Då kan RMS spänningar, eller dess fasvinkel skilja sig. Obalansen definieras som kvoten mellan minusföljdspänningen och den plusföljdspänningen över ett antal perioder [1]:

$$u_u = \frac{|V_i|}{|V_d|} * 100 = \frac{Minusföljd}{plusföljd} * 100 \quad (6)$$

Det är endast grundtonen som används för att räkna fram obalansen, alla övertoner filtreras bort genom diskret fourier transform algoritm.

Spänningsobalans på maximalt 1-2 % anses acceptabelt enligt europanormen.

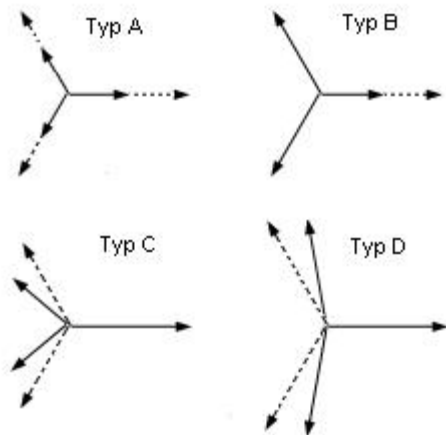
2.4.6 Transformatorns inverkan på spänningsdippars karaktäristik

Det finns tre typer av transformatorlindningar som kan påverka spänningsdippens utseende:

- Transformatorer som inte ändrar spänningen. Detta är yy kopplade transformatorer där båda primär- och sekundärsida är jordade.
- Transformatorer som eliminerar nollföljdsspänningen. Det betyder att spänningens sekundärsida är lika med primärsidan minus nollföljdsspänningen. Exempel på detta är yy kopplade transformatorer med en eller bägge sidor ojordade, samt dd kopplade transformatorer.
- Transformatorer som utbyter fas och huvudspänningar. Varje sekundärspänning motsvarar då skillnaden mellan två primärspänningar. Exempel är Yd, Dy och Yz kopplade transformatorer.

Ovanstående transformator kategorier har olika klocknummer som inverkar på fasvridningen mellan primär och sekundärsida. Spänningsdippens karaktäristik vid lasten kommer inte att påverkas av klocknumret. Det som har betydelse är spänningen före felet samt spänningen under felet, både i amplitud och fasvinkel.

I [5] klassas spänningsdipparna utifrån deras amplitud och fasvridning. Klasserna A, B, C, D, E, F eller G finns presenterade i figur 2.8.



Figur 2.8 Vektordiagrammen för sju olika spänningsdippar

Dipparna presenterade i ekvationsform:

Typ A

$$V_a = V$$

$$V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$$

$$V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}jV\sqrt{3}$$

Typ C

$$V_a = 1$$

$$V_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}j\sqrt{3}$$

$$V_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$$

Typ B

$$V_a = V$$

$$V_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}j\sqrt{3}$$

$$V_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$$

Typ D

$$V_a = V$$

$$V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}j\sqrt{3}$$

$$V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$$

Tabell III Spänningsdippens utseende på nerspänningssidan av transformatorn när primärspänningen upplever en spänningsdipp från klass A, B, C, D.

Transformatorns kopplingssätt	Typ A	Typ B	Typ C	Typ D
YNyn	A	B	C	D
Yy, Dd, Dz	A	D*	C	D
Yd, Dy, Yz	A	C*	D	C

*) V är inte lika med ett utan är egentligen lika med $\frac{1}{3} + \frac{2}{3}V$, där V representerar spänningen i fasen felet inträffar.

Transformatorerna på 130kV och neråt är oftast y-delta kopplade, det motsvaras av den nedersta raden i tabell IV.

2.4.7 Åtgärder för att reducera effekten av spänningsdippar och korta avbrott

Det bästa sättet att komma åt problemet är att genomföra åtgärder så nära källan som möjligt. Eftersom impedansen i nätet är avgörande för hur djup spänningsdippen är konstruktionen av elnätet en avgörande faktor. T.ex. kan separation av skenorna på mellanspänningsnivå bidra till reduktion av impedansen som i sig reducerar dippens storlek [5].

För att kompensera för spänningssänkningarna som uppstår kan UPS eller spänningsregulatorer DVR (Dynamic Voltage Restorer) installeras. En spänningsregulator använder en booster transformator för att inducera den saknade spänningen tillbaka till matningen. En spänningsregulator kan också kompensera för spänningsökningar. Vanligtvis är apparater känsligare för spänningsökningar än för spänningsdippar, men eftersom spänningsdippar förekommer oftare är marknaden störst här. Unitrafo och ABB levererar spänningsstabilisatorer med olika komplexitet, se bilaga 8.1.2.

Värt att notera är att en avancerad spänningsstabilisator kan behöva stort utrymme och bli kostsamt. Lösamheten för installation kan beräknas genom Internet baserade programmet Omniverter [9].

För att öka toleransen hos frekvensomriktare kan störningsfria frekvensomriktare från NFO vara ett alternativ. De har löst det stora problemet med att hindra läckströmmar till jord så att oskärmade kablar kan användas mellan omriktare och last. Dessa finns för tillfället endast på effektnivåer upp till 11 kW, men utvecklingen går mot större drivsystem. Nackdelen med dessa är dock att verkningsgraden försämras.

En mer traditionell utrustning är motorgeneratorer som använder den lagrade rotationsenergin i svänghjulet för att förse lasten med el under dippen eller avbrottet.

2.5 Transienter

Ström och spänningstransienter är relativt outforskade i jämförelse med spänningsdippar, övertoner och spänningsobalans. Bristen på intresset ligger i svårigheten att koppla en specifik transient till en utrustnings feldrift eller skada. Däremot vet man att transienter genererade från omkopplingar, överspänningar från åsknedslag, eller magnetisering av kondensatorer skapar allvarliga följder för elutrustningen [6].

Transienter definieras som snabba förändringar i spänningen. På grund av dets snabba förlopp och en viss kontinuitet sägs störningen vara högfrekvent. Transientförloppet varierar från några tiotal nanosekunder upp till några millisekunder.

Det finns två kategorier av transienter:

1. Impulstransienter
2. Oscillatoriska transienter

Impulstransienter är positiva eller negativa spikar som varar i mycket kort tid och har ett lågt energiinnehåll. Den korta stigtiden på ca 1 mikrosekund med varaktigheten 50ns-1ms gör att det är endast utrustning i närheten av storkällan som påverkas. Det gäller inte transienter orsakade av blixtnerslag som kan störa nätet långt från nerslagspunkten. Oscillerande transienter karaktäriseras av mycket snabba ändringar i spänningens eller strömmens polaritet

och genereras främst i samband med kopplingar av olika slag. Speciellt vanligt förekommande är de när omkopplingen sker i utrustning med kraftelektronik. De högfrekventa transienterna med frekvensen 5-500 kHz kan ha en varaktighet på 0.3-50 ms, som betyder att de dämpas fort. Transientens energiinnehåll kan beräknas med hjälp av formel 7, där är T tiden då transientens amplitud har sjunkit till 10 % av dets maximala värde. V representerar differensen mellan den minimala och den maximala spänningen hos varje spänningsvariation i transienten. Eftersom oscillerande transienter har flera och ibland djupare spänningsförändringar jämfört med impulstransienter, är energiinnehåll högre hos oscillerande transienter.

$$E = \int_0^T V(t)^2 dt \quad (7)$$

På grund av att oscillerade transienter har högre energiinnehåll orsakar vanligtvis mer skada i en elanläggning än en impulsiv enkelriktad transient. Undantaget är åskströmmar. Oscillatoriska transienter kan ibland uppfattas som ett övertonsproblem.

2.5.1 Transienters ursprung

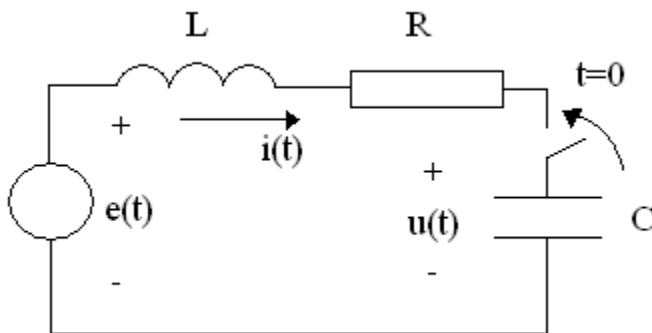
Transienter kan orsakas av kopplingar, blixtnerslag, eller kortslutningar någonstans i elnätet. När t.ex. en ledning skall kopplas till elnätet slås brytaren till och en transient uppstår p.g.a. spänningsskillnaderna mellan den spänningssatta ledningen och den icke spänningssatta ledningen.

Transienter orsakade av kopplingar kan delas in i fyra grupper:

1. Kapacitansens magnetisering i samband med uppladdning
2. Kapacitansens avmagnetisering i samband med urladdning
3. Magnetisering av induktor
4. Avmagnetisering av induktor

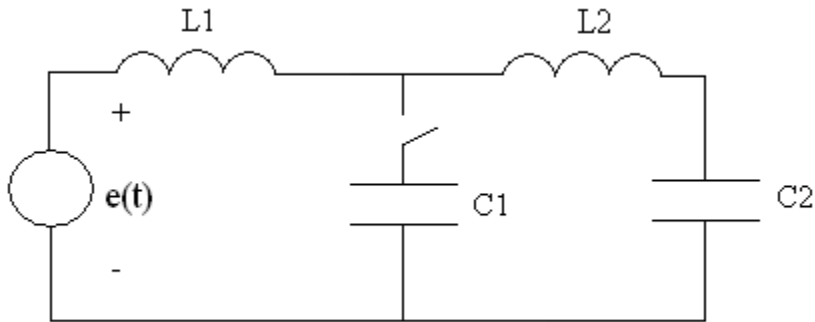
De allvarligaste problemen uppstår i samband med transienter orsakade av kapacitansens magnetisering, medan de andra tre omkopplingarna inte genererar några allvarliga transienter.

I ögonblicket när kapacitansen kopplas in är $t=0$, se figur 2.7, sjunker spänningen raskt mot noll efterföljt av en oscillation mellan L och C med en frekvens på några hundra Hertz.



Figur 2.9: Kondensatorn slår till i ett nät med resistans, induktans och kapacitans

När kondensatorbatteriet kopplas in uppstår en dämpad oscillation mellan induktansen och kapacitansen. Till och från kopplingar av kondensatorbatterier kan förstärka transienten längre ner i elnätet om kondensatorer finns kopplade även här [6]. Det kan leda till seriösa problem med driften och orsaka fysiska skador på elutrustningen. För att illustrera det tydligt kan ett ekvivalent schema ritas såsom i figur 2.7, där C1 motsvarar kondensatorn som magnetiseras, medan C2 befinner sig någonstans längre ner i nätet.



Figur 2.10 Kondensatorn C1 kopplas i ett nät bestående av kondensatorbatteri C2 längre ner i elnätet

När en kortslutning eller ett fel uppstår i elnätet sänks spänningen till nära noll i denna punkt, medan andra delar av elnätet upplever en spänningsdipp. Hur djup dippen är beror på avståndet från kortslutningspunkten, ju närmare kortslutningen desto djupare är spänningsdippen, se kapitel 2.4.1.

En inducerad åskström når sitt max på några få mikrosekunder upp till 10-20 mikrosekunder och avtar sedan till nära noll efter några hundra mikrosekunder. Den mindre delen av strömmen kan vandra kvar i systemet några få sekunder [6].

Anledningen till att spänningen aldrig når riktigt noll i kortslutningspunkten beror på impedansen mellan kortslutningspunkten och elnätet. Blixten behöver inte slå ner direkt på en ledning i elnätet, för att orsaka skada, den kan även slå ner i stolpar eller i närheten av ledningar. En blixtnärhet i närheten av ledningar kan inducera strömmar i ledningen p.g.a. magnetfältet som blixten alstrar.

Flera faktorer påverkar transientens fortplantning i elnätet såsom impulsens frekvensspektrum, ledningsimpedansen vid denna frekvens, samt tidpunkten när transienten inträffar i förhållande till fasvinkeln hos spänningens grundfrekvens [8].

2.5.2 Konsekvenser av transienter

Transienter kan slå genom isolation och skapa kortslutning. Genomslagen förekommer där isolationen har sämst egenskaper d.v.s. där isolationen är som tunnast eller där det finns luftbubblor i isolationsmaterialet. Att materialet innehåller dessa egenskaper kan bero på fel i produktionen eller slitage av ledningen.

Elektronik, styrsystem och datorer är typiskt känsliga för transienter, det är därför inte helt ovanligt att frekvensomriktare, datorer och annan elektronikbaserad utrustning ofta upplever

driftstörningar. En av de sämsta tänkbara konsekvenserna är blixtnerslag som leder till jordfel. Det kan leda till att utrustning går sönder eller att personsäkerheten riskeras. Oscillatoriska transienter som orsakas av en svängning mellan L och C har större energimängd och är därför ett större hot för anläggningar och apparater.

Transformatorer och motorer kan få kortslutningar mellan lindningsvarven om de utsätts för branta transienter. Ett sätt att skydda de är att koppla in en kondensator med låg impedans mellan fas och noll och därmed fungera som en avledare för transienterna.

2.5.3 Åtgärder för reduktion av transienter

För att skydda sig från höga åskströmmar och spänningar är installation av ventilavledare ett effektivt sätt att eliminera transienterna. Ventilavledare installeras när luftledningar övergår till kablar i mark. Det brukar ske när elen skall matas in till ett ställverk. Ibland installeras även ventilavledare vid utgående matning i ställverket ifall det finns risk att spänningen slår ner i ställverket, eller på den utgående matningen för då kan den sprida sig åt båda håll. Olika typer av avledningsskärmmingar kan användas för att skydda känsliga områden i en anläggning såsom ex-klassade områden. Ett eget jordsystem för att avleda åskan är då vanlig. Det är viktigt att jordsystemet har så låg impedans som möjligt så att åskan tar jordningsvägen och inte går via något annat som kan leda den till det känsliga området.

Kommunikations och datautrustning kan skyddas genom att ett filter kopplas i serie med ingången eller genom att mata utrustningen med avbrottsfri kraft, UPS. UPS existerar både i batteriform (kemisk kraft) och i en relativt nyutvecklad form som kallas svänghjul eller flywheel på engelska. I UPS baserade flywheels används energin i ett roterande mekaniskt element för att förse lasten med el under ett avbrott [10]. Fördelen med dessa är att de har hög leveranssäkerhet, kräver inget underhåll, är lättare p.g.a. liten konstruktion, plus att miljön inte påverkas lika negativt i form utav batterisyra. Livstiden på en flywheel baserad UPS är på 12-15 år och förkortas inte eller försämras av att det används såsom med batteribaserade UPS där livslängden för ett oanvänt batteri ligger på 10 år och neråt. UPS:en har snabb återladdningstid och kan fungera i princip alla miljöer oavsett temperatur [10]. Den enda nackdelen med en flywheelbaserad UPS kontra de vanliga är förstås kostnaden. Företag som Catepillar, Pentadyne & Liebert och Beacon distribuerar UPS med flywheel teknologi.

För att undvika oscillerande kopplingstransienter kan krafthalvledare såsom tyristorer och transistorer och synkroniserade brytare användas istället för de traditionella ställverksbrytarna. Synkroniserade brytare innehåller styrsystem som bestämmer när brytningen skall genomföras. Det minskar påfrestningar på kontroll och hjälpkretsar samt utrustningen högre upp i nätet.

ABB:s synkroniserade brytare SafeSync kopplar på mellanspänningsnivå i fasernas nollgenomgång. ABB:s DYNAKOMP är ett tyristorkopplat filterbatteri för lågspänning som motverkar reaktiva spänningssänkningar och kopplar transientfritt.

2.6 Övertoner

En överton är en ton som förekommer tillsammans med en grundton, men har högre frekvens. Harmoniska övertoner innebär att deras frekvens är en jämn multipel av grundtonen. Följaktligen blir då de icke harmoniska övertonerna ojämna multiplar av grundtonen.

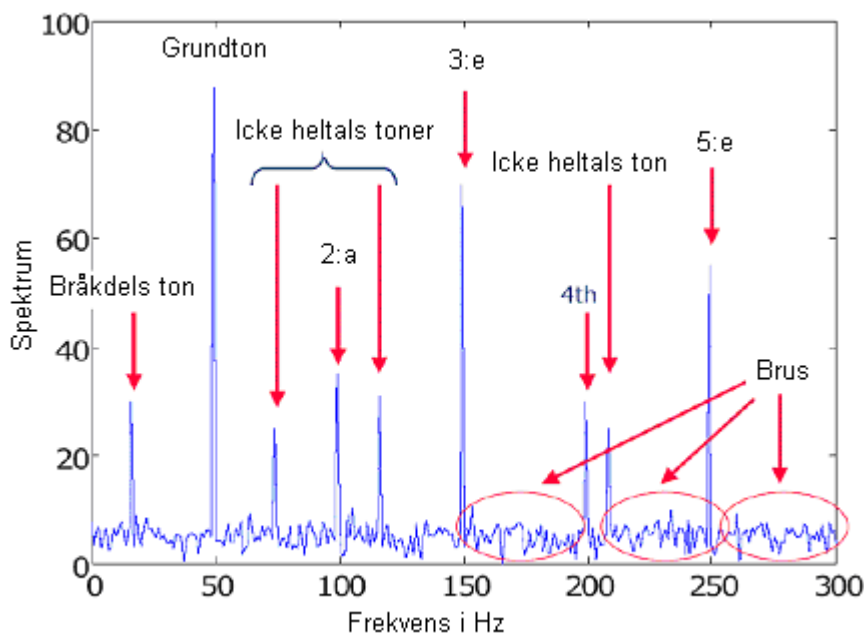
Övertoner skapas av olinjära laster i elsystemet och deformerar strömmar och spänningars 50 Hz sinuskurvor. Ickelinjära laster innebär att strömmen inte är proportionell mot spänningen, dvs. en ökning av spänningen med några få procent kan få strömmen att dubblas och få en annorlunda vågform. Frekvensomriktare, styrenheter och generellt instrument med inbyggd elektronik är exempel på övertonsalstrare. Eftersom övertonerna är multiplar av grundfrekvensen har den första harmoniska tonen frekvensen 50Hz (1x50Hz), den andra övertonen har frekvensen 150Hz (2x50Hz) osv.

Man brukar skilja mellan sinusformade övertoner och icke sinusformade övertoner. De sinusformade övertonerna kan antingen uppstå som udda multiplar av grundfrekvensen, jämna multiplar eller som bråkdels av grundtonen. De icke sinusformade övertonerna är ingen heltalsmultipel av grundtonen. I industrimiljöer är de icke sinusformade övertonerna vanliga eftersom det vanligen är områden med många olinjära laster med likriktare i någon form.

2.6.1 Beskrivning av övertoners analysmetoder

Det finns två sätt att analysera övertoner:

- Tidsspektrum: Strömmar och spänningar mäts med avseende på tiden så att en periodisk kurva upprätthålls. En närmare analys måste genomföras för att beräkna storleken på övertonerna, exempelvis fourier analys.
- Frekvensspektrum: Här fås en direkt översikt över alla övertonerna och dess storlekar, samt brus, se figur 2.8.



Figur 2.11 Frekvensspektrum på övertoner upp till den 6:e övertonen

Det är vanligt att en smutsig signal innehåller både övertoner, bråkdels toner, icke heltals ton och brus såsom visat i figur 2.8. Bruset syns som osymmetriska förändringar på alla frekvenser, medan övertonerna har tydliga spikar på specifika frekvenser. En spänning innehåller främst grundtonen som visas i figuren då grundtonen ligger nära 100 % av spänningen, spänningen på de andra frekvenserna är logiskt nog lägre och har därför lägre

procenthalt. Men i figuren finns ingen relevans i övertonernas storlek, eftersom de endast brukar ligga på några få procent.

Vilken som helst periodisk deformerad våg kan uttryckas som en summa av rena sinusvågor i form av en Fourier serie [1]. Hur fourier analysen för spänningen kan se ut visas nedan, där k anger deltonens ordning.

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2}V_k \text{Cos}(k2\pi f_0 t + \phi_k) \quad (8)$$

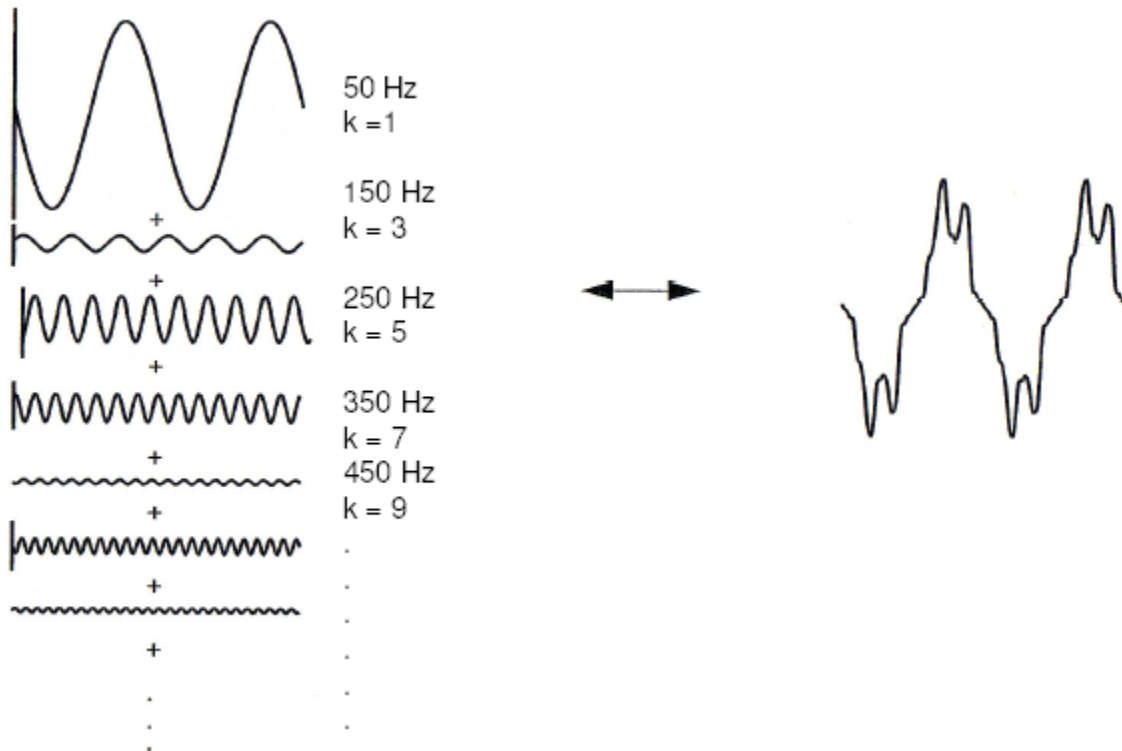
Frekvensspektrumet från den samplade vågen erhålls med nedanstående formel där DFT står för Diskret Fourier Transformering.

$$X_k(f_k) = \frac{1}{N} \text{DFT}\{x(t_n)\} \quad (9)$$

$$X_k = \text{DFT}\{x(t_n)\} = \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) \{W_N\}^{kn} \quad (10)$$

$$W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}} \quad (11)$$

En DFT kan avgöra hur stora övertonerna är i jämförelse med grundtonen. I figur 2.9 presenteras en bild över hur övertonerna ändrar sinuskurvans utseende.



Figur 2.12 När sinuskurvans grundton blandas ihop med övertonernas sinusvågor bildas en deformerad våg såsom till höger i bilden.

Genom att analysera den deformerade vågen till höger i figur 2.9 kan man avgöra vilka övertoner som ligger överlagrade på sinuskurvan

Den totala strömmen med övertoner kan uttryckas som

$$i(t) = I_0(t) + \sum_{k=1}^N I_k \sqrt{2} \cos(2\pi k f_0 + \phi_k) \quad (12)$$

Där N anger övertonegens nummer. För en kontinuerlig signal är N oändlig medan i ett samplat system är N hälften av antalet samplingspunkter per period. Med en samplingshastighet på 6,4 kHz blir antalet samplingspunkter 128, och därmed N=64. $f_0=50$ är grundtonen eller den fundamentala frekvensen, periodtiden blir då följande:

$$T = \frac{1}{f_0} = 20\text{ms} \quad (13)$$

För att definiera hur mycket den rena sinusvågen har deformerats kan ett procentvärde på andelen övertoner i förhållande till grundtonen räknas ut. Den totala störningshalten kallas THD och kommer från engelskans Total Harmonic Distortion.

Summan av alla spänningsövertoner dividerat med grundtonen V_1 ger spänningens THD [1]:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} \quad (14)$$

På samma sätt fås strömmens THD:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \quad (15)$$

Effektfaktorn, PF (PF = Power Factor), är ett värde på förhållandet mellan aktiv effekt och skenbar effekt. Den kan, i de fall sinuskurvan innehåller låg halt av distortioner, delas upp i två termer PF_{dist} och PF_{displ} . Den första faktorn i uttryck (18), PF_{dist} , motsvarar amplitudförhållandet i effekten, medan PF_{displ} i formel (19) beskriver färförskjutningen mellan ström och spänning.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{V_1 I_1 \cos(\varphi_1 - \psi_1)}{V_1 I_{RMS}} = \frac{I_1}{I_{RMS}} \cos(\varphi_1 - \psi_1) \quad (16)$$

$$PF_{Dist} = \frac{I_1}{I_{RMS}} \quad (17)$$

$$PF_{Displ} = \cos(\varphi_1 - \psi_1) \quad (18)$$

$$PF = PF_{Dist} \times PF_{Displ} \quad (19)$$

Effektfaktorn har ett direkt samband med THD enligt nedan:

$$PF_{Dist}^2 = \frac{1}{1 + THD^2} \quad (20)$$

Ju lägre PF_{displ} är desto mer reaktiv effekt finns i elsystemet. Det beror på att produkten av ström och spänning i vissa fall blir negativ eftersom strömmens och spänningens kurvor inte ligger i samma fasläge längre [1].

2.6.2 Formfaktor

Formfaktorn, C_r anger hur mycket distortion som spänningens toppvärde innehåller. Den kan beräknas som förhållande mellan spänningens maxvärde och spänningens RMS värde enligt följande.

$$C_r = \frac{V_{Max}}{V_{RMS}} \quad (21)$$

Formfaktorn beskriver därför hur mycket spänningens sinuskurva skiljer sig från en likspänningssignal. För en perfekt sinuskurva är formfaktorn lika med $\sqrt{2}$ därför är det ibland enklare att uttrycka ett relativt värde på formfaktorn, c_r . Den uttrycker hur mycket signalen skiljer sig från en sinussignal enligt.

$$c_r = \frac{V_{Max}}{\sqrt{2} \cdot V_{RMS}} \quad (22)$$

2.6.3 Övertonernas karaktär

En övertons fasläge beror på var på grundtonen som övertonen bildats. En grundläggande indelning i tre grupper enligt denna ordning är följande:

- Plusföljdskaraktär
- Minusföljdskaraktär
- Nollföljdskaraktär

I tabell III presenteras övertonernas karaktär fram till den 15:e övertonen

Tabell V: Övertoners följdkaraktär i ett balanserat system

Namn	G	2:a	3:e	4:e	5:e	6:e	7:e	8:e	9:e	10:e	11:e	12:e	13:e	14:e	15:e
Frekvens	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750
Fasläge	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Övertoner med plusföljdskaraktär är medroterande. Det betyder att övertonsströmmen i en induktionsmotor som har positivt fasläge, har samma riktning på det roterande magnetfältet som grundtonens magnetfält. Övertoner med minusföljd är motroterande, som betyder att övertonsströmmar med negativt fasläge har motsatt roterande magnetfält. Övertoner med nollföljd får däremot ingen rotationsriktning [3].

De första udda övertonerna såsom 3:e, 5:e och 7:e är de vanligaste förekommande övertonerna ute i elanläggningarna. Den 5:e och den 7:e övertonen är dock karakteristiska övertoner för industrier och genereras främst i olinjära trefaslaster [1 3] . Den 3:e övertonen genereras främst från olinjära enfaslaster. Jämna övertoner uppstår när strömmens positiva och negativa periodhalva inte är symmetrisk. Sådana laster reglerar effektuttaget med hjälp av en diod.

2.6.4 Symmetriska övertoner

Om fasläget för tre symmetriska 50 Hz spänningar är förskjutna 120° kommer momentanvärdet på en av faserna alltid att motsvaras av summan av de två andra faserna vilket betyder att summan blir noll. Samma sak gäller när fasströmmarna är symmetriska. Alla övertoner som har positiv och negativ fasvinkel kommer vid symmetri att ta ut varandra i nollan.

Det är däremot annorlunda med den tredje övertonen. Eftersom den har fasläget noll kommer de tre 150 Hz strömmarna i respektive fas inte vara förskjutna i förhållande till varandra. Följden av detta blir att, istället för att de tar ut varandra, adderas strömmarna i nollan och den totala strömmen i nollan blir summan av de tre 3:e fasströmmarna. Den tredje övertonen brukar därför sägas ha nollföljdskaraktär. Det samma gäller för de övriga övertonerna där faserna har fasläge noll, så kallade trippelövertoner såsom 9:e, 15:e samt den 21:e.

2.6.5 Resonans

På grund av att elnätet innehåller kombinationer av induktanser och kapacitanser kommer impedansen sätt från strömmen i en viss punkt att vara mycket stor. Effekten av detta syns i form av att spänningen ändras kraftigt även för små strömändringar.

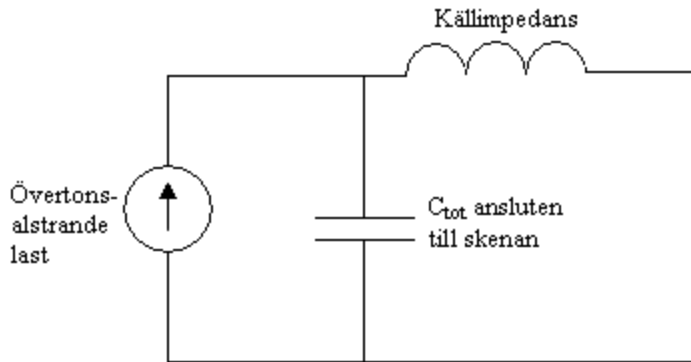
Om vi bortser från resistansen kommer impedansen sätt från övertonsströmmen att vara följande:

$$Z(\omega) = \frac{j\omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (23)$$

Impedansen blir oändlig vid resonansfrekvensen:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (24)$$

Vid resonansfrekvensen går höga strömmar genom källimpedansen och kondensatorbatteriet, det gäller även då lastströmmen är liten. Figur 2.10 illustrerar en modell för hur elsystemet ser ut med induktans, kapacitans och en övertonsalstrande last.



Figur 2.13: Förenklad modell över ett elsystem med övertonsalstrande last

Den idéella strömkällan ger en oändlig förvrängt övertonsspänning på skenan kopplat till lasten, samt ger en oändlig övertonsström som går genom kapacitansen och induktorn.

Övertonsförstärkningen begränsas av två effekter:

- Resistansen i systemet kommer att avgöra impedansen vid resonansfrekvensen
- Den här modellen kan inte tillämpas för övertoner alstrade på högspänningsnivå

Enligt [6] är resonansfenomen vanliga i elsystem med kondensatorbatterier på mellanspänningsnivå. Med utgångspunkt från hur dessa kondensatorbatterier brukar dimensioneras ligger resonansfrekvensen på 200Hz-300Hz. Även långa kablar leder till resonans, men då på högre frekvenser där övertonshalten är lägre och dämpningen högre.

2.6.6 Övertonernas påverkan

Konsekvenserna av övertoner ser olika ut för olika utrustning. I roterande maskiner förekommer högre dielektriska förluster samt ett högre brus p.g.a. varierande moment. I kondensatorer kan övertonerna orsaka överbelastning då kondensatorns impedans avtar med frekvensen enligt

formeln $Z_c = \frac{1}{2\pi fC}$. Även högre dielektriska förluster förekommer i kondensatorer samt

resonans som förstärker strömmar och spänningar. På grund av strömförträngning (ytverkan) i koppar och ökande virvelströmsförluster i järnkärnor, använda i distributionstransformatorer med frekvenser högre än 50 Hz, ökar värmeförlusterna i ledare och transformatorer. Följderna är åldring av el-utrustning i förtid, reducerad driftsäkerhet, skadad isolation (risk för kortslutning och, eller elektriska stötar), giftig gas och rökutveckling, i vissa fall brand och i värsta fall explosion [7].

Strömövertoner är sällan ett problem förutsatt att dimensioneringen av transformatorer och kablage har tagit hänsyn till förlusterna som övertonerna skapar. Det är däremot mer bekymmer med spänningsövertoner som alstras från strömövertonerna.

3:e övertonsströmmarna tar inte ut varandra i nollledaren, utan förstärker varandra som resulterar i följande:

- I nollledaren i 3 fas distributionssystem förekommer höga halter av övertonsströmmar (därför överhettning)

- Upphettning i delta lindningssidan i distributionstransformatoren på grund av nollföljds flux

Förvrängningen av spänningen begränsar maskinens immunitet mot spänningsobalans.

Kondensatorbatterier nämns ibland, felaktigt, som en källa till övertoner. De orsakar inte övertoner, utan det uppstår resonans med impedanser, speciellt transformatorimpedanser som leder till förstärkning av övertonsströmmarna och spänningarna som genereras av de olinjära lasterna.

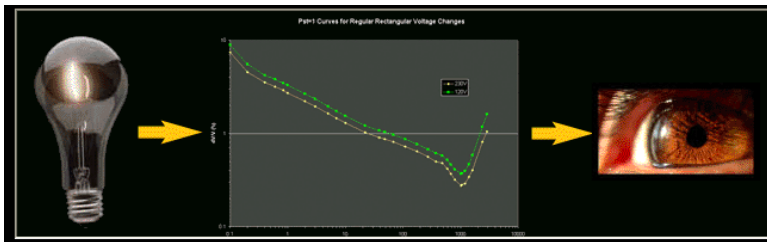
2.6.7 Åtgärder för att reducera övertoner

Det kan vara svårt att hitta källan till övertoner eftersom de lätt sprider sig i ett nät. Åtgärderna för att minska övertonerna beror på vilken last som de genereras av och varifrån de kommer. Ett sätt att komma åt problemet är att koppla ur resonans och förstärkningskretsar, exempelvis genom att koppla bort kondensatorbatterier. Ett annat sätt kan vara att gå till källan av övertonsgenereringen och där begränsa utsläppet. Den vanligaste åtgärden för höga halter av övertoner är att filtrera bort dem med ett övertonsfiler uppbyggda av kondensatorer, reaktorer och ibland även motstånd. Filtren dimensioneras så att helheten bildar en avstämd krets som ger låg impedans vid en specifik frekvens. Detta innebär att strömmen av närliggande högre frekvenser till stor del också filtreras bort.

Det finns två filtertyper: Passiva filter och aktiva filter. Passiva filter är uppbyggda av passiva komponenter och finns som bandpassfilter som ger en mycket bra filtrering vid en specifik frekvens och högpassfilter som dessutom har ett dämpmotstånd som effektivt dämpar höga frekvenser och ger större bandbredd. Aktiva filter är mer avancerade för de genererar övertoner av samma frekvens och injicerar ut de på nätet i motfas.

2.7 Flimmer

Flimmer är snabba variationer i spänningen som påverkar ljuskällor så att ögat kan uppfatta det. Ögats känslighet för spänningsvariationer beror bl.a. på lampans blink-frekvens. Det betyder att små spänningsförändringar med ”fel” frekvens kan vara mycket känsligare för ögat än stora spänningsförändringar med ”rätt” frekvens. Den mänskliga uppfattningsförmågan är känsligast för ljusstyrkor med spänningsvariationer i frekvensområdet 2-15 Hz. I figur 2.14 presenteras flimmerkurvan som anger ögats känslighet med avseende på frekvens. Kurvan väger även in en termisk tidskonstant för glödlampor.



Figur 2.14 Spänningsvariationernas frekvens avgör ögats känslighet

Vid ca 10 Hz har vi ett maximum där ögat är känsligast för fluktuationer i spänningen som matar ljuskällan.

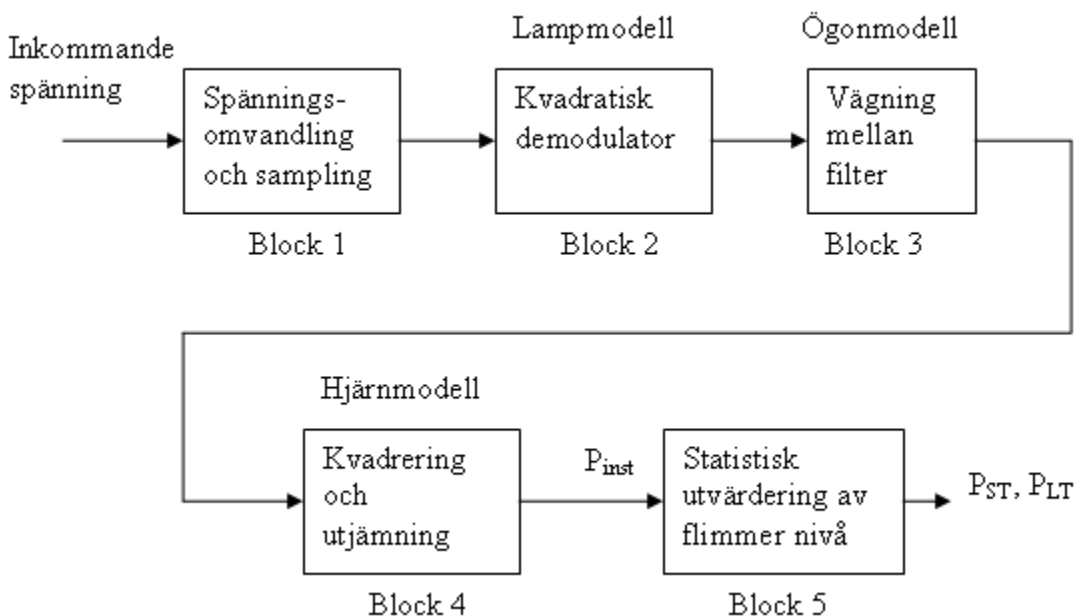
2.7.1 Mätning av flimmer

Flimmer kan spridas över stora geografiska områden kring storkällan, speciellt om nätet är svagt. Det finns en norm, baserad på experiment, som bestämmer vilken flimmernivå vi kan acceptera. I experiment har man tagit reda på när flimmer blir störande för ögat. Nivån på flimmeret anges med ett P värde, där P är en förkortning av det franska ordet för flimmer, Pappillotement. P_{inst} är ett momentanvärde som grundas på hur öga och hjärna samverkar och reagerar på ljusflimmer med olika frekvenser från en glödlampa [1 8].

Den internationella standarden IEC 61000-4-15 beskriver mätmetoder och algoritmer för hur flimmerparametrarna P_{inst} , P_{ST} och P_{LT} skall uträknas. P_{inst} är det momentana flimmervärdet som registreras kontinuerligt var tionde minut och som sedan sorteras och presenteras i ett varaktighets diagram. Momentanvärdet beskrivs som ett procentvärde av ögats känslighet för en viss flimmernivå som 50 % av personerna i en testgrupp uppfattar. T.ex. om $P_{inst} = 1$ så kommer, statistisk sätt, hälften av personerna i gruppen uppleva flimmernivån som störande.

Flimmerparametrarna P_{ST} och P_{LT} beskriver korttidsvärdet respektive långtidsvärdet på flimmergraden. Korttidsvärdet, P_{ST} , beräknas utifrån en statistisk analys över det momentana flimmervärdet P_{inst} över en tiominutersperiod. Från P_{ST} kan långtidsvärdet P_{LT} beräknas utifrån en två timmars period. Parametrarna P_{ST} och P_{LT} uttrycks i per unit och är ett procentvärde av flimmernivån som uppfattas som irriterande av flertalet människor i en testgrupp [1 8].

I nästföljande figur 2.12 presenteras ett blockdiagram för hur flimmeret kan beräknas utifrån samplad spänning.



Figur 2.15 Ett block diagram över hur flimmernivån kan tas fram utifrån samplad spänning

I block 1 skalas signalen samtidigt som den filtreras och samplas. Sedan i nästföljande block separerar den kvadratiske demodulatorens modulersignalen från bärvågen och de lågfrekventa frekvensvariationerna flyttas till basbandet 0-30 Hz . Det tredje blocket består av en

kaskadkoppling mellan två bandpassfilter. Det första filtret eliminerar DC komponenten samt dubblar grundfrekvensens växelströmskomponent. Det andra filtret har en mittfrekvens på 8,8 kHz och simulerar frekvenskurvan till sinusformade spänningsvariationer hos en glödlampa på 60W i kombination med ögats uppfattning. Block 4 innehåller kvadrering och ett första ordningens lågpassfilter. Ögats flimmer känslighet simuleras i block 2, 3 och 4, utsignalen från block 4 motsvarar det momentana flimmervärdet.

P_{ST} beräknas från följande formel:

$$P_{ST} = \sqrt{0.0314P_{inst,0.1} + 0.0175P_{inst,0.7} + 0.0175P_{inst,1} + 0.0175P_{inst,1.5} + 0.0219P_{inst,2.2} + 0.0219P_{inst,3} + 0.0219P_{inst,4} + 0.056P_{inst,6} + 0.056P_{inst,8} + 0.056P_{inst,10} + 0.056P_{inst,13} + 0.056P_{inst,17} + 0.0267P_{inst,30} + 0.0267P_{inst,50} + 0.0567P_{inst,80}} \quad (25)$$

$P_{inst,n}$ är P_{inst} värdet överskridet för n % över en 10 minuters period.

P_{LT} baseras på en observationstid på 2 timmar och räknar in effekten av flera störande laster som opererar slumpvis. P_{LT} räknas ut på följande sätt:

$$P_{LT} = \sqrt[3]{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{STi}} \quad (26)$$

Här är P_{STi} ett värde på P_{ST} var 10:e minut, då är $N=12$ för en observationstid på 2 timmar.

Enligt europastandarden EN 50160 skall det 95 procentiga långtidsvärdet på flimmernivån, P_{LT} , inte överskrida 1.

$$P_{inst,50s} = \frac{(P_{inst,30} + P_{inst,50} + P_{inst,80})}{3}$$

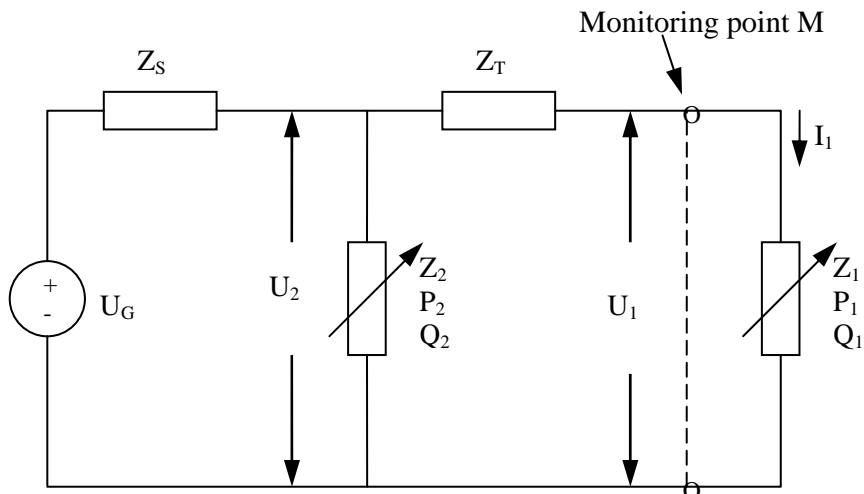
$$P_{inst,10s} = \frac{(P_{inst,6} + P_{inst,8} + P_{inst,10} + P_{inst,13} + P_{inst,17})}{5}$$

$$P_{inst,3s} = \frac{(P_{inst,2.2} + P_{inst,3} + P_{inst,4})}{3}$$

$$P_{inst,1s} = \frac{(P_{inst,0.7} + P_{inst,1} + P_{inst,1.5})}{3}$$

2.7.2 Flimmereffekt

För att ta reda på flimmerriktningen kan flimmereffekten tas fram. En referenspunkt kallad monitoring point pekas ut och genom effektvärdet i punkten kan riktningen på flimmeret bestämmas. Det är intressant för Gryaab att kontrollera om flimmeret orsakas av industrin själv eller om den kommer utifrån av en last närliggande i distributionsnätet. När en spänningssänkning i monitoring point, M resulterar i en strömökning i samma punkt orsakar industrin själva flimmeret [11]. Och om strömmen reduceras i samband med att spänningen minskar, befinner sig flimmerkällan ovanför mätningpunkten M, se figur 2.13.



Figur 2.16 modell över nät och last i förhållande till monitoring point

2.7.3 Åtgärder för att reducera flimmer

Flimmer bestäms utav snabba spänningsvariationer och de vanligaste lasterna som orsakar detta är ljusbågsugnar, svetsmaskiner och bilskrotsanläggningar. Det beror på att lasterna tar ut stora strömmar under korta tidsperioder och på så sätt sänker spänningen under korta perioder. Flimmer påverkar enbart människor och eftersom spänningsvariationerna är så små påverkas inte apparater och maskiner.

Flimmer kan reduceras genom att stabilisera effektuttaget, exempelvis genom att installera serioreaktorer på ugnar eller med hjälp av styrd kompensering som motverkar lasternas reaktiva effektuttag. ABB produkter som reducerar flimmerhalter är SVC, SVC light och den dynamiska spänningsstabilisatorn DYNAKOMP. SVC light är en mer avancerad teknik uppbyggd med snabbreagerande transistorteknik som förbättrar flimmernivån med upp till 2-3 gånger jämfört med konventionell teknik.

3 Induktionsmotorer och varvtalsstyrning

Induktionsmotorer med tillhörande varvtalsreglering är vanliga i alla typer av industrier. Det är inte så konstigt med tanke på att motorns effektuttag kan reduceras på ett mjukt och effektivt sätt. På Gryaab regleras både pumpar, omrörare och fläktar via frekvensomriktare. För att förstå vad det handlar om kommer här ett kapitel för att beskriva hur asynkronmotorn, som är den vanligaste induktionsmotorn, ser ut och även en modell av en frekvensomriktare. Vidare redogörs för vilka typer av störningar som motorn får från styrningen.

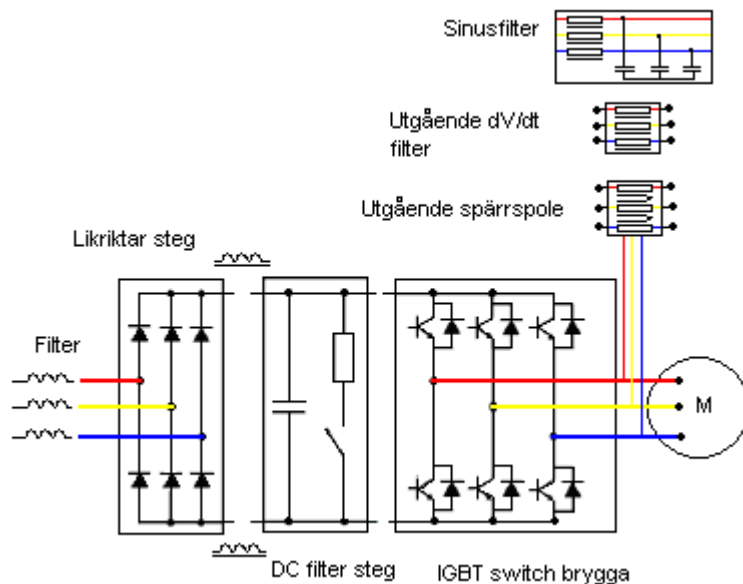
En induktionsmotor är en asynkronmotor som använder fasernas växelspanning i statorn för att skapa ett roterande magnetfält över rotorn. Magnetfältet inducerar strömmar i rotorn som i växelverkan med magnetfältet får motorn att snurra. För att rotorn skall snurra måste magnetfältets hastighet skilja sig från rotorns hastighet. Annars kommer inte magnetfältet att röra sig relativt rotorns ledare och då induceras inga strömmar i rotorn.



Figur 3.1 En burlindad asynkronmotor

I figur 3.1 ser vi hur lindningarna är lindade runt tre järnkärnor för att skapa tre faser. 12 kopparstänger indikerar att den har tolv poler (6 polpar).

För att styra varvtalet hos induktionsmotorn som driver pumparna på Gryaab används frekvensomriktare. Induktionsmotorn styr pumparna som med hjälp av vavtalsstyrningen justerar flödena hos vattenmassorna. På Gryaab är det oundgängligt med frekvensomriktare på de områden där flöden måste regleras. Det finns vissa pumpar däremot som inte behöver frekvensstyrning. Vidare följer en beskrivning av hur en frekvensomriktare är uppbyggd och vilka fördelar respektive nackdelar den har. En frekvensomriktare hackar upp den matande växelspanningen till en likspänning för att sedan återskapa en ny växelspanning med hjälp ut av switchning från en transistorbrygga (IGBT-brygga). Den nya växelspanningen blir smutsigare eftersom den innehåller spänningsskomponenter på andra frekvenser än 50 Hz.



Figur 3.2 En förenklad modell över frekvensomriktarens uppbyggnad.

I figur 3.1s första steg likriktas växelspänningen så att en DC spänning kan mata den switchande IGBT bryggan. Ett kondensatorbatteri är placerat för att hålla uppe spänningen till den switchande IGBT bryggan. Kondensatorbatteriets parallellkopplade resistans kallas för bromsresistor och kopplas in då DC spänningen överskrider ett förinställt värde. Syftet är att resistorn skall ta emot energiöverskottet i kretsen i form av värme för att undvika skador på switchbryggan [14]. Vanligtvis placeras ett EMC filter samt en linje reaktor innan likriktarsteget för att förhindra att genererade övertoner sprids på inkommande matning till frekvensomriktaren [13]. Enligt [13] innehåller motorns switchade signal dV/dt kurvor samt mycket högfrekventa störningar, RFI. [13] föreslår fyra alternativ till att begränsa fenomenen. Begränsningar av dV/dt och transienta spänningar är särskilt nödvändigt när långa kablar är kopplade mellan frekvensomriktaren och motorn. Det beror på att spänningstoppar och snabba spänningsförändringar ökar i förhållandet till längden. Det kan leda till partiella urladdningar i kabelns isolation som leder till motorhaveri tidigare än beräknat. I vissa situationer kan den reflekterade vågen förstärkas vilket förstärker även dessa fenomen.

Applikationer som begränsar dV/dt och spänningstransienter på utgående switchade signal är:

1. Drossel för dV/dt begränsning
2. Drossel för dV/dt begränsning och dämpning
3. Utgående drossel (spärrspole)
4. Sinusfilter

Numren anger rangordningen på komplexiteten. Den första drosseln är den minst komplexa och begränsar endast snabba spänningsförändringar, dV/dt . Toppvärdet på strömtransienterna och spänningstransienterna begränsas markant. I nästföljande drossel ökar begränsningen av dV/dt och spänningens toppvärde, men reaktorerna i den tredje applikationen är ännu

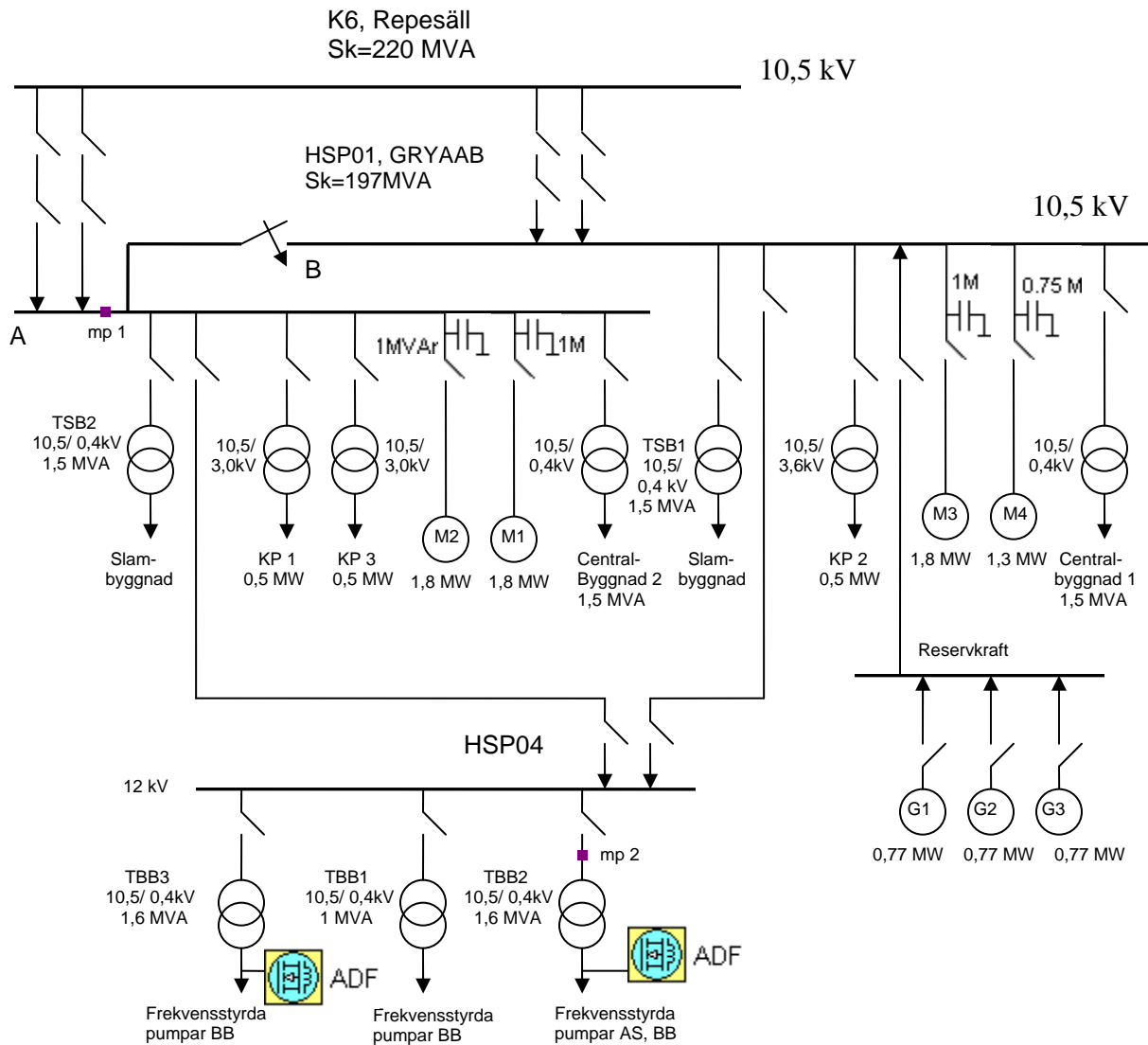
effektivare och kan kompensera för laddningsströmmar i kabeln. Det kan främst behövas när längre kablar kopplar motorn till frekvensomriktaren. Med ett inkopplat sinusfilter på utgående terminal ökas motorns verkningsgrad, förlusterna reduceras ihop med att bruset reduceras. Fördelen med sinusfilter är tillämpningen av långa och ibland oskärmade kablar. Nackdelen är att motorspänningen inte kan överstiga 90 % av matningsspänningen samt att filtrets temperatur ofta är högt (30-180°C).

På grund av frekvensomriktarens switchande genereras högfrekventa störningar såsom övertoner, snabba ström- och spänningstransienter och brus. Ifall störningarna inte åtgärdas blir elen till motorn smutsigare, men också elen ut till nätet blir smutsig. Det betyder att andra elapparater kopplade till samma elnät får smutsig spänning på sin inkommande matning, det resulterar i att apparatens immunitetsnivå sänks. Stigtiden på sinuskurvans switchade pulser ligger mellan 0,1-0,8us. Det innebär att en motor med en 10-15 meter lång kabel kan ha dubbelt så höga spänningar i lindningen som i frekvensomriktarens mellanled vilket är ca 35 % högre än motorns matningsspänning.

Anledningen till att frekvensomriktare trippar när spänningen sjunker tillräckligt är att kondensatorbatteriet i likriktarsteget inte kan hålla uppe spänning som växelströmsbryggan behöver för lastens ökade strömbehov. Omriktaren tar ingen skada av trippandet utan trippandet i sig är just för att skydda elektronikkomponenterna i omriktaren. Men enligt Danfoss man kan räkna med att den normala livslängden på ca 15 år möjligen reduceras med knappt ett år om styrenheten trippar ett flertal gånger per år.

4 Elkvalitetsmätning

Mätning har pågått från början av april 2008 till slutet av augusti 2008. Elkvalitetsmätaren UP2210 har kontinuerligt samplat data i Gryaabs inkommande 10,5 kV centralställverk. Spänningen och strömmen mäts på högspänningsskenan och mätpunkten har markerats som mp1 i figur 4.1. Ett antal uppehåll har gjorts för att sampla mätdata från ytterligare intressanta punkter i elnätet, bl.a. i Biobädden som är markerat med mp2 i figuren nedan.



Figur 4.1 Förenklat enlinjeschema över Gryaabs elnät. Under normaldrift går matningen endast via skena A, det betyder att skenorna A och B är ihopkopplade

Mätningen inleddes i april med en veckas mätperiod på B-skenan över knappt hälften av Gryaabs laster. Då studerades mestadels hur apparaten fungerade och en uppfattning om hur störningshalten såg ut kunde bildas. Nästföljande mätperiod på drygt 3 månader har varit grunden för studien av Gryaabs elkvalitet. För att få en liten inblick i hur störningar har artat

sig i andra delar av Gryaabs elsystem, har elkvalitetsmätaren samplat ström och spänning nära tänkta störningsalstrare. Induktionsmotorn IN_PU4040 är känd för att vara problembehäftad av Gryaab på grund av lagrens servicefrekvens samt hur denne beter sig, speciellt i förbindelse med start. Därför mättes strömmen i statorlindningens kortslutningspunkt under en kortare period för analys av motorns beteende under stopp, start och maximal effekt.

Ytterligare kända störgeneratorer finns på lågspänningssidan av transformatorerna matade från 12 kV biobäddsställverket HSP04. Lasterna består av stora frekvensstyrda induktionsmotorer som styr avloppspumpar. På grund av, främst, höga halter övertoner på 400 V sidan, är aktiva filter inkopplade på lågspänningssidan av två stycken 1,6 MVA transformatorer, se ADF i figur 4.1. I HSP04, mättes ström på högspänningssidan av utgående linje till transformator TBB2 och spänningen mättes på högspänningsskenan. Transformator TBB2 matar ut till de fem största frekvensstyrda induktionsmotorerna AS_PU0110-AS_PU0150.

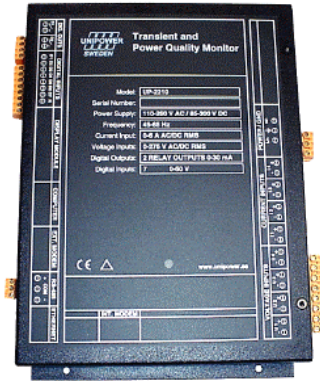
I kapitel 4.4 presenteras mätning och resultat från HSP04.

4.1 Mätmetod och analysverktyg

Unipowers avancerade 3-fas elkvalitets- och störningsanalysatorn UP 2210 har varit det huvudsakliga mätverktyget under arbetet. Mätdata har automatiskt lastats ner till en databas hos företagets tillverkare Unipower och har kunnat hämtas via en Internet uppkoppling. Ytterligare metoder för att hämta data är direkt via kabel RS-232 eller RS-485. Med hjälp av 10Base-T, GSM modem eller via internt modem kan data hämtas om Ethernet eller allmänna telefonnätet är tillgängligt.

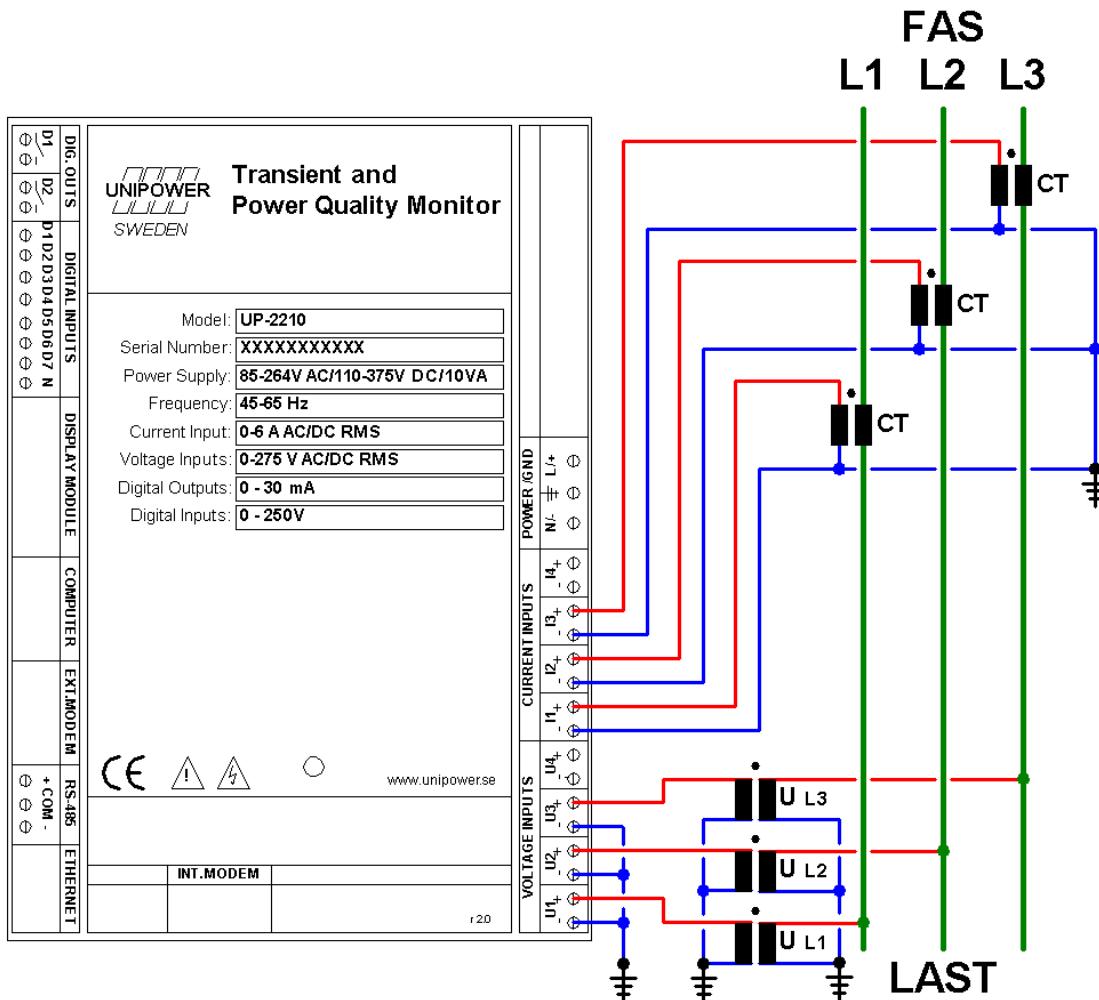
För att instrumentet skall upptäcka snabba händelser som t.ex. transienter behövs snabb samplingstid. Nackdelen med snabb samplingstid är att stora mängder data behöver sparas i enheten som tar mycket minnesutrymme. Med en kortare samplingstid under normaldrift och ett inbyggt anti alias filter som upptäcker snabba förlopp har Unipower löst detta problem. Mätdata lagras som punkter där linjer dras emellan punkterna för att skapa en graf. Om samplingshastigheten är för låg och snabba ändringar i mätvärdet uppstår kommer inte dessa att synas. Anti alias filtret konstruerar en alias av det snabba förlopp som saknas och arbetar då i ett bestämt frekvensband för att upptäcka dessa [12]. Upptäckten som Anti alisa filtret gör registreras som en händelse i dataprogrammet PQ Secure och händelseförloppet samplas med en högre samplingstid så att den kan studeras i PQ Secure.

Apparaten är avsedd för fast installation i en central eller ett ställverk och är därför försedd med plintar. Den kan kopplas på olika sätt beroende på var man mäter och vad syftet med mätningen är. Eftersom fokus låg på störningsanalys mättes fasspänningarna och strömmarna.



Figur 4.2 Unipowers UP 2210 samplade spänning och ström

Med inkopplingsmetoden som tillämpades i mätningen mättes alla tre fasspänningar och strömmar. Mätmetoden uppfyller inte elkvalitetsstandarden SS EN 50160, då denna baseras på huvudspänningar, den används när fokus ligger på störningsanalys.

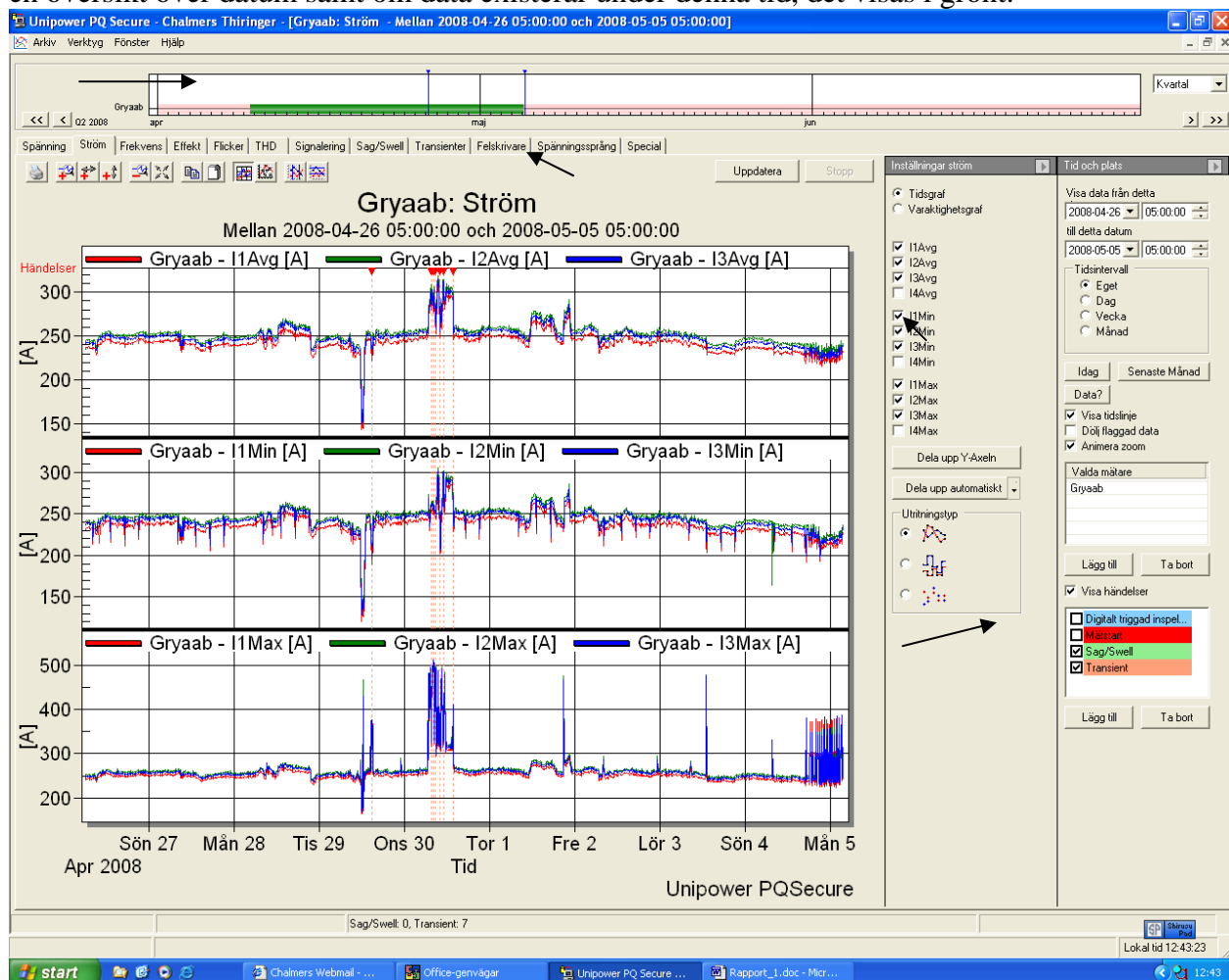


Figur 4.3 UP2210 mätte fasspänningarna på följande vis

Genom utvärderingsprogrammen PQSecure och PQOnline har grafer från mätvärden kunnat studeras. PQ Secure och PQ Online är integrerade analysverktyg i mätsystemet, de täcker analysfunktioner, händelselistor, trenddiagram, kurvformsdiagram, varaktighetsdiagram (ITIC/CBEMA), automatisk rapportering samt realtidsfönster. PQSecure innehåller loggad data som töms via modemuppkoppling till en databas en gång per dygn. Här sparas händelselistor och det exakta händelseförloppet kan analyseras, samt alla elkvalitetsparametrar. Det realtidsvisande programmet PQ Online kan endast användas med direkt uppkoppling till mätenheten via kabel eller modem. Programmet visar grafiskt de sinusformade ström- och spänningskurvorna, fasförskjutningen och amplituden i ett vektordiagram, samt frekvensspektrum av fasernas övertoner. Konfigurationen av t.ex. mättransformatorernas omvandlartal etc. genomförs i PQ Online.

4.1.1 PQ Secure

PQ Secure är programmet som till största dels har använts i studien av mätresultatet. Här presenteras all loggad data grafiskt utifrån RMS värden samt grafer på de definierade elkvalitetsparametrarna såsom flimmer, övertoner, obalans, spänningstransienter och spänningsdippar etc. Bilden nedan visar hur programmet är utformat. Längst upp i figur 4-2 är en översikt över datum samt om data existerar under denna tid, det visas i grönt.

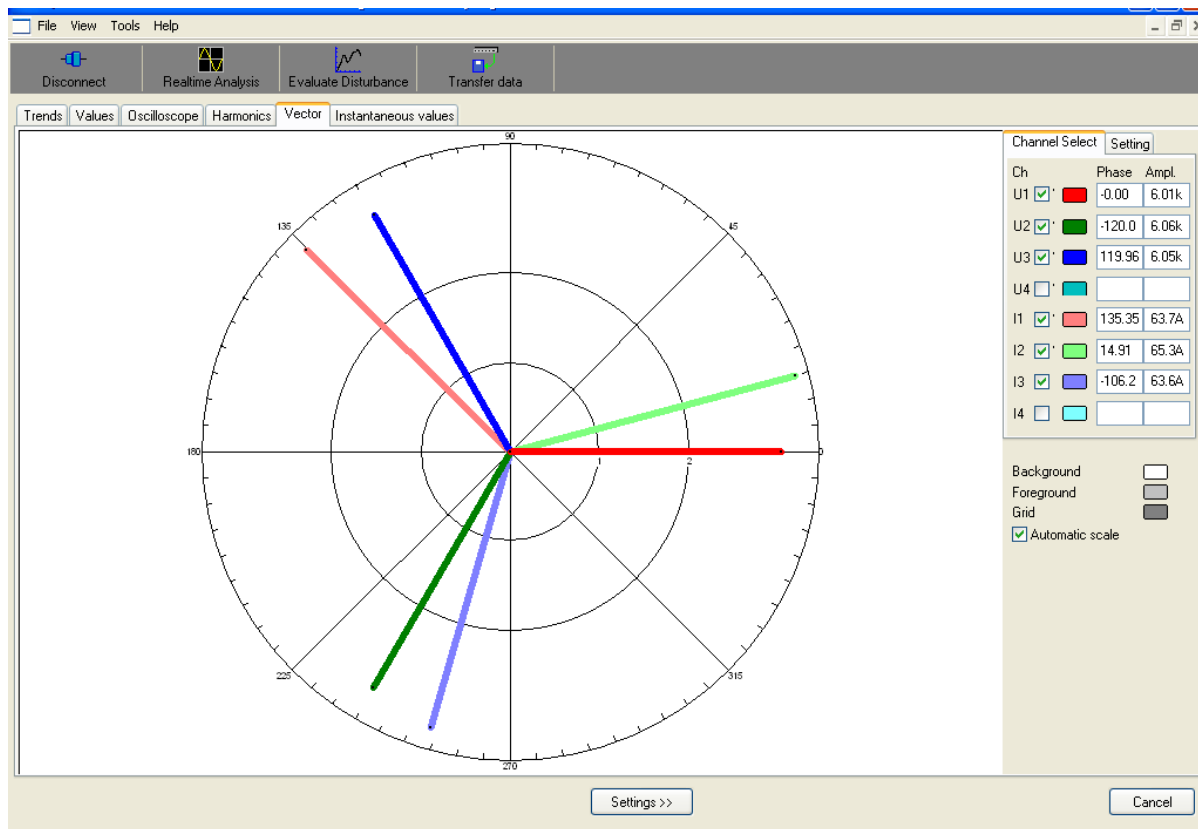


Figur 4.4 PQSecure presenterade kurvor på lagrad data, I händelselistan bockar man för vilka händelser som skall synas på grafen. Här syns transienterna i rött.

I flikerna kan man välja att se graferna från spänningens RMS värde, strömmens RMS värde, frekvensen, effekten, flimmer, THD, signalering, sag/swell, transienter eller spänningsprång. För att se vissa samband kan man i fliken helt till höger, som heter special, välja exakt vilka kurvformer som skall presenteras.

4.1.2 PQ Online

I PQOnline presenteras samplingen direkt på dataskärmen. Här visas sinuskurvan och de individuella övertonerna presenteras i ett stapeldiagram. Det behövs en modemuppkoppling eller en RS232 kabel mellan apparaten och datorn för att komma åt datan. Alla konfigurationer genomförs i PQ Online. I figur 4.5 ser vi hur vektordiagrammet ser ut.



Figur 4.5 Vektordiagram i PQ Online som visar realtidsvärden.

Från flikerna i PQ Online kan man välja att se trender, siffror på alla parametrar, THD, alla individuella övertoner samtidigt, oscilloskop, vektordiagram samt realtidvisande RMS värden på spänning och ström. I programmet presenteras inga händelser såsom spänningsdippar eller transienter. Ifall data inte hämtas automatiskt via t.ex. en server måste UP2210:an tömmas inom en viss tid, för detta ändamål behövs PQOnline.

4.2 Standarder och mätnoggrannhet

Elkvalitetsparametrarna kan tas fram på olika sätt beroende på programtillverkare, det gör att det kan vara orättvist att jämföra mätresultat framtagna av olika program. Däremot är det acceptabelt att jämföra data i samma klass enligt den internationella standarden IEC 61000-4-30.

Standarden IEC 61000-4-30 definierar mätmetoder och uträkningsmetoder för större elkvalitetsparametrar och händelser. Parametrarna klassas i antingen klass A som innebär högst noggrannhet eller klass B som kan användas för statistiska kartläggningar etc. där högre osäkerhet tillåts. Inga uträkningsmetoder definieras i klass B som i klass A, men tillverkaren av instrumentet bör specificera mätmetoderna.

Mätutrustningen UP 2210 är CE märkt samt uppfyller alla standarder som angår elkvalitet och dess mätmetoder. Bland annat uppfylls ovannämnda standard IEC 61000-4-30: 2003, klass A som innebär att osäkerheten vid spänningsmätning är maximalt $\pm 0,1$ %. Vidare så uppfylls klass 1 i standard IEC 61000-4-7: 2002 för övertonsmätning, samt standard 61000-4-15:2003 som omhandlar flimmermätning.

Mätutrustningen samt de integrerade analysverktygen för elkvalitetsmätningen uppfyller följande standarder för:

Tabell VI Definitioner av vilka standarder som mätenheten uppfyller

EMC	Spänningskvalitet	Övertoner	Flimmer
Emission: EN 50081-1,2	EN 50160	IEC 61000-4-7	IEC 61000-4-15
Emission: EN 50082-1,2	EN 61000-2-2		
Immunitet: IEC 61000-6-4	EN 61000-2-12		
Immunitet: IEC 61000-6-2	SS 421 18 11		

För maximal mätnoggrannhet synkroniseras mätenheten till nätfrekvensen via en faslåsning (phase-locked-loop-PLL). Enheten är försedd med anti-alias filter enligt IEC 61000-4-7.

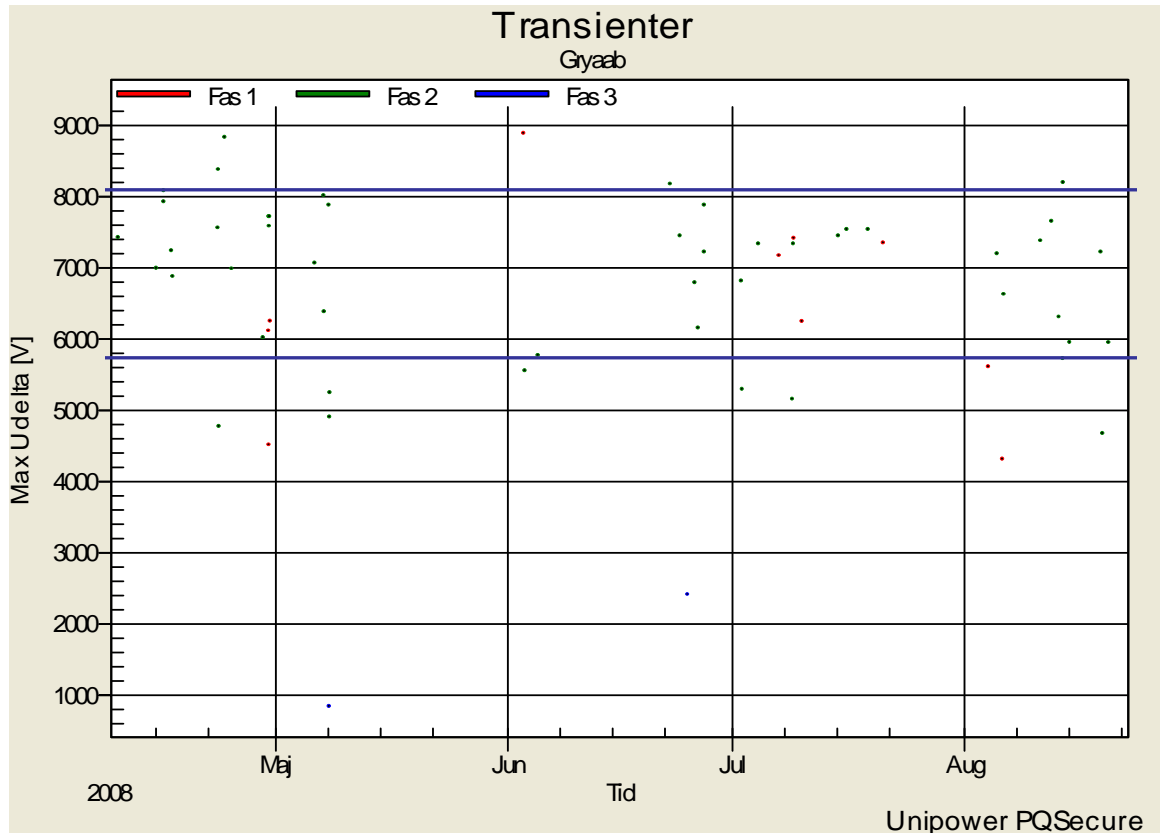
4.2.1 Samplingsfrekvens

Samplingsfrekvensen i ett 50 Hz system ligger på 6400 Hz - 12800 Hz beroende på frekvens och händelser. Frekvensen kan mätas i området 45-65 Hz. Transienter detekteras ner till 1 mikrosekund med hjälp av inbyggda peakdetektorer på spänningskanalerna.

Eftersom mätenheten uppfyller klass A villkoren i standarden IEC 61000-4-30 innehåller tidsintegrationsfönstret 10 cykler i ett 50 Hz system. Med följande tidsintervall som bas definieras tre mätintervaller, 150cykler, 10minuter och 2 timmar. 150 cykel rms värde tas fram som roten ur medelvärdet i kvadrat av femton 10 cykel rms värden. Tidsfönstret skall vara kontinuerlig och inte överlappande så att det är lätt att kontrollera att 150 cykelvärdet är det korrekta värdet.

5 Resultat från elkvalitetsmätningen

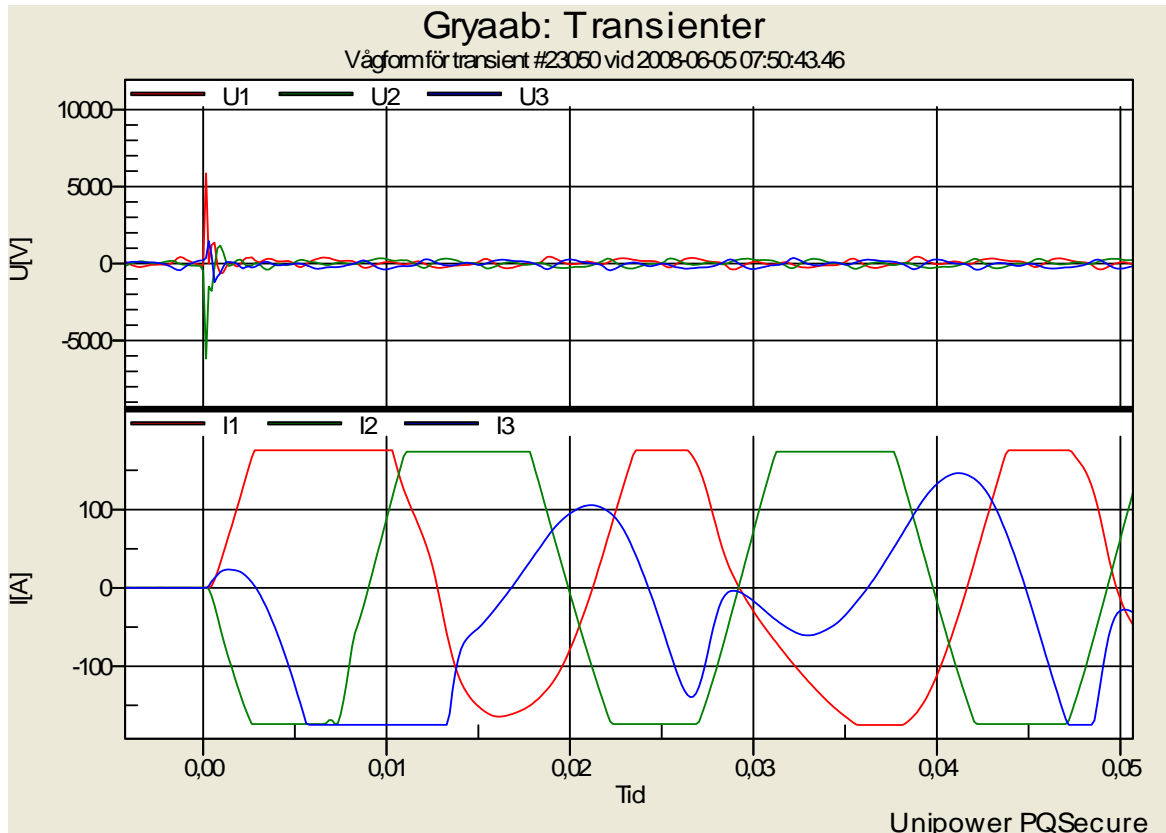
Under mätperioden i centralställverket inträffade 58 negativa spänningsstransienter, varav 56 transienter orsakades i samband med att brytaren till inloppspumpen IN_PU4040 kopplades till i ställverket. Det har konstaterats genom jämförelser mellan ställverksdatorns uppgifter om omkopplingar samt Gryaabs processprogram Delta V:s effektkurvor från reningsverkets eldrivna motorer. Orsaken bakom de resterande två transienterna är okänt. Det går inte att koppla transienterna till något händelseförlopp i ställverket, det kan betyda att transienterna är genererade utifrån. Dock är det troligtvis osannolikt eftersom högfrekventa störningar verkar lokalt p.g.a. av dess snabba händelseförlopp. Fem timmar innan transienten registrerades kopplades pump IN_PU4040 in, utan att generera någon transient, något som varken har inträffat tidigare eller senare under mätningen. I figur 4.4 presenteras alla registrerade transienter i centralställverket samt två transienter registrerade i Biobäddens ställverk HSP04. Transienterna registrerade i Biobädden inträffade i början på juni och hade toppspänning på nära 9 kV och 5,5 kV.



Figur 5.1: Antalet registrerade spänningstransienter under mätperioden

Utifrån figuren ser vi att de flesta spänningstransienterna ligger mellan 6 kV - 8 kV. Det motsvarar transienter på 100-133 % av referensspänningen på 6 kV. 96,6 % av transienterna inträffar i samband med att IN_PU4040 kopplas till.

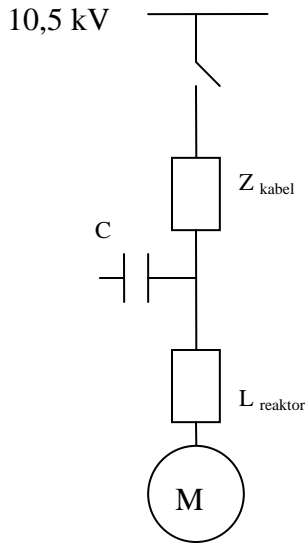
Utseendet på transienten orsakad av IN_PU4040:s omkoppling presenteras i figur 5.2.



Figur 5.2 Transient i samband med inkopplingen av IN_PU4040. Den övre kurvan visar det högfrekventa förloppet då grundtonen är bortfiltrerad. Den undre visar strömmen i statorns y-punkt då reaktorerna är inkopplade.

Den övre spänningskurvan i figur 5.2 visar det högfrekventa förloppet av spänningsförändringen när grundfrekvensen är bortfiltrerad. Det konstiga utseendet på strömkurvan beror troligen på att vi befinner oss utanför mätområdet för strömmen. Reaktorn som begränsar strömmen till motorn är inkopplad under förloppet.

Det kan finnas flera faktorer som spelar in varför just IN_PU4040 genererar transienter i samband med start. Skillnaden kan ligga i hur kondensatorbatterien är kopplade, IN_PU4040s kondensatorbatteri är nämligen kopplad i ställverket efter ställverksbrytaren, medan de andra är direktkopplade till motorn med egen kabel. En enkel modell över hur kapacitanserna och induktanserna är kopplade kring motorerna IN_PU1040, 2040 och 3040 presenteras i figur 5.3.



Figur 5.3 Modell av matningskrets till inloppspumparnas motorer IN_PU1040, 2040 och 3040

Kretsens resonansfrekvens kan beräknas enligt följande

$$f_s \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Under starten av motorn är motorns reaktorspole inkopplad i nio sekunder. P.g.a. att spolens induktans är stor i jämförelse med statorlindningens impedans kan den försummas i beräkningen av resonansfrekvensen. Detsamma gäller för kabelns impedans, då denne är liten i jämförelse med resten av kretsen. Kondensatorbatteriets märkeffekt är 1MVar, märkspänningen är 11 kV. Omräknat till impedans blir kapacitansen följande.

$$Q = \frac{U^2}{X} \tag{27}$$

$$X = \frac{U^2}{Q} = \frac{(11 \cdot 10^3)^2}{1 \cdot 10^6} = 121 \Omega$$

$$X = \frac{1}{j\omega C} \Rightarrow C = \frac{1}{j\omega X} = \frac{1}{j2 \cdot \pi \cdot f \cdot 121} = 26,3 \mu F$$

Den totala kapacitansen i kondensatorbatteriet är 26,3 μF medan kapacitansen per fas är $C_{\text{fas}} = 8,77 \mu F/\text{fas}$

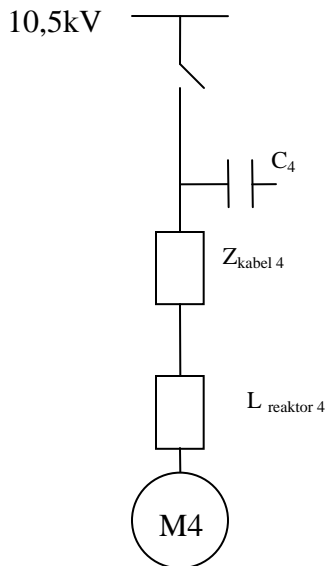
Reaktorspolens induktans kunde avläsas direkt på spolen:
 $L_{\text{reaktor}} = 22,28 \text{ mH}/\text{fas}$

Med utgångspunkt i ovanstående märkcapacitans och märkinduktans blir resonansfrekvensen

$$f = 360 \text{ Hz}$$

När lindningar och kablar är uppvärmda ökar impedansen. Det betyder att resonansfrekvensen också kommer att öka.

IN_PU4040 är tillkopplad en krets med annorlunda induktans och kapacitans än de övriga tre vilket betyder att resonansfrekvensen skiljer sig.



Figur 5.4 Matningskrets till induktionsmotorn IN_PU4040

Kondensatorbatteriet i anslutning till IN_PU4040 är y-kopplat och har märkeffekt på 750kVAr samt märkspänningen 11 kV. Reaktorspolen i anslutning till statorlindningen har märkinduktansen 52 mH.

Med formel 27 beräknades kapacitansen till $C=23,87 \mu\text{F}$.

Per fas blir det
 $C_{\text{fas}}=7,96 \mu\text{F/fas}$

Reaktorspolens kapacitans per fas blir
 $L_{\text{reaktor}}=52 \text{ mH/fas}$

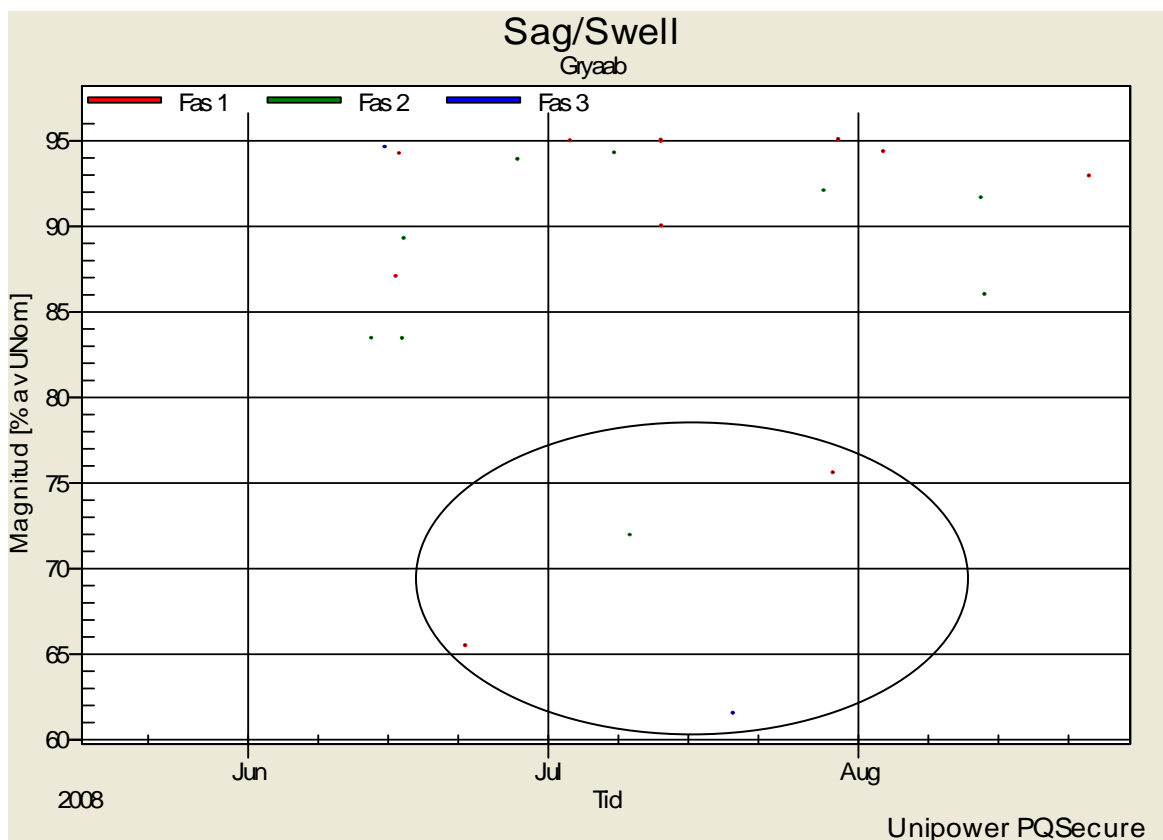
Med formel 24 blir resonansfrekvensen
 $f = 247,4 \text{ Hz}$

Resonansfrekvensen beskriver vid vilken frekvens som spänningen förstärks.

Transienten som inträffar i samma sekund motor IN_PU4040 kopplas in beror troligen på att mätpunkten, mp1 befinner sig närmare oscillationen mellan kapacitansen hos kondensatorbatteriet till IN_PU4040 och induktansen i motorn.

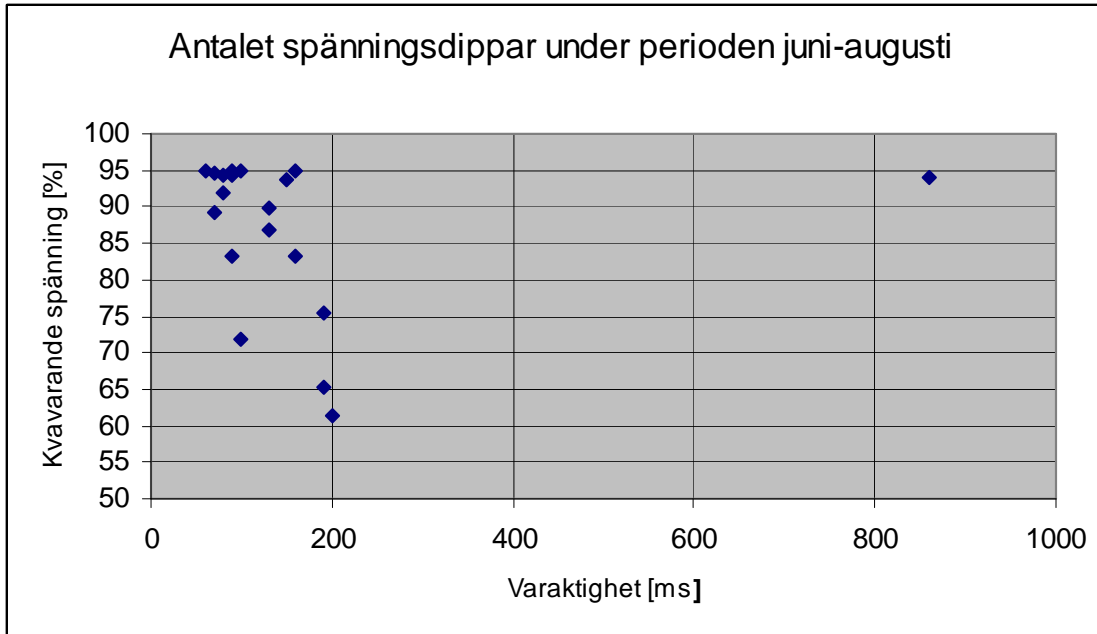
Transienterna ger inga synliga skador i anläggningen, men bidrar till ökat slitage av motorn.

21 stycken spänningsdippar inträffade på Gryaab under mätperioden varav 4 stycken av dessa trippade frekvensomriktare, motorer och filter på 400 V sidan av HSP04. Den kvarvarande spänningen (mätt i HSP01) låg mellan 60 % - 75 % och hade en varaktighet mellan 100 ms - 200 ms. I figur 5.5 presenteras alla de registrerade spänningssänkningarna. Det inringade området visar de fyra mest allvarliga spänningssänkningarna som trippade stora frekvensomriktare och induktionsmotorer kopplade till HSP04.



Figur 5.5: Totala antalet spänningsdippar under mätperioden

Från figuren kan man konstatera att alla spänningsdippar inträffar under sommarmånaderna då åskväder är ett vanligt fenomen. De fyra inringade dipparna som löste ut frekvensomriktarna har alla sitt ursprung från åskvädret. 95 % av spänningssänkningarna kommer uppifrån nätet enligt PQSecure. Efter samtal med Göteborg energi konstaterades att alla dippar under 80 % registrerade hos både Gryaab och Göteborg energis ställverk K6 i Repeshäll härstammar från högre spänningsnivåer än 10 kV. Troligtvis från 130 kV då dippens varaktighet ligger under 200 ms. I figur 5.6 presenteras djupet och varaktigheten på de inträffade spänningsdipparna.



Figur 5.6 Totala antalet spänningsdippar på Gryaab

Som vi kan se från figuren har 95 % av alla dipparna en varaktighet på mindre än 200ms. Dippen som avviker från resten av gruppen ligger på gränsen för att registreras som en händelse då den har en kvarvarande spänning på 94,14 %. Det är inget särskilt som kan knytas till spänningssänkningen. Med utgångspunkt i att antalet felande faser visar sig i hur många faser som drabbas i spänningsdippen presenteras de vanligaste felen i tabellen nedan.

Tabell VII: karakteristik över felvarianter

Fel	Antal	Total andel [%]
3-fas fel	15	61,90
2-fas fel	2	9,52
1-fas fel	4	19,05
Summa	21	90,48

Utifrån tabellen ser vi at balanserade fel är det vanligast förekommande felet. Det är också det mest märkbara felet.

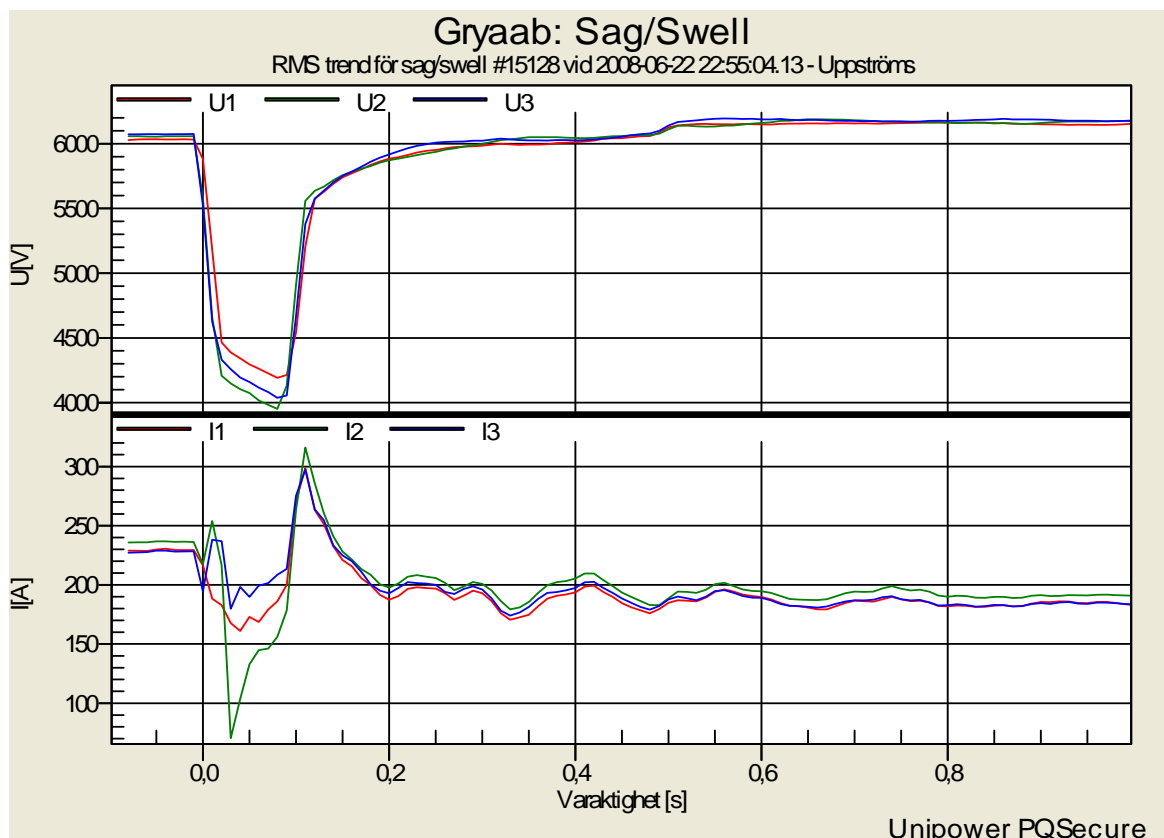
Europastandarden EN 61000-2-12 sätter gränsvärden för hur djupa spänningssänkningarna får bli. I tabell VII kategoriseras skadligheten hos spänningssänkningar utifrån djup och varaktighet. Det gula området markerar spänningsdipparna som flertalet apparater inte hanterar.

Tabell VIII: Antalet spänningsdippar under mätperioden enligt Semistandard F47. Gult område markerar att gränsvärdet har överskridits. Det blå området markerar att dippen har orsakat stopp av drift på Gryaab.

Kvarvarande spänning [%]	10ms < t ≤ 50ms	50ms < t ≤ 200ms	200ms < t ≤ 500ms	500ms < t ≤ 3s
$90 \leq U < 95$		9		1
$80 \leq U < 90$		6		
$70 \leq U < 80$		2		
$50 \leq U < 70$		2		
$10 \leq U < 50$				
$0 \leq U < 10$				

Det blå området i figuren markerar ingenting i standarden utan det anger området där frekvensomriktare och motorer i anslutning till HSP04 trippar.

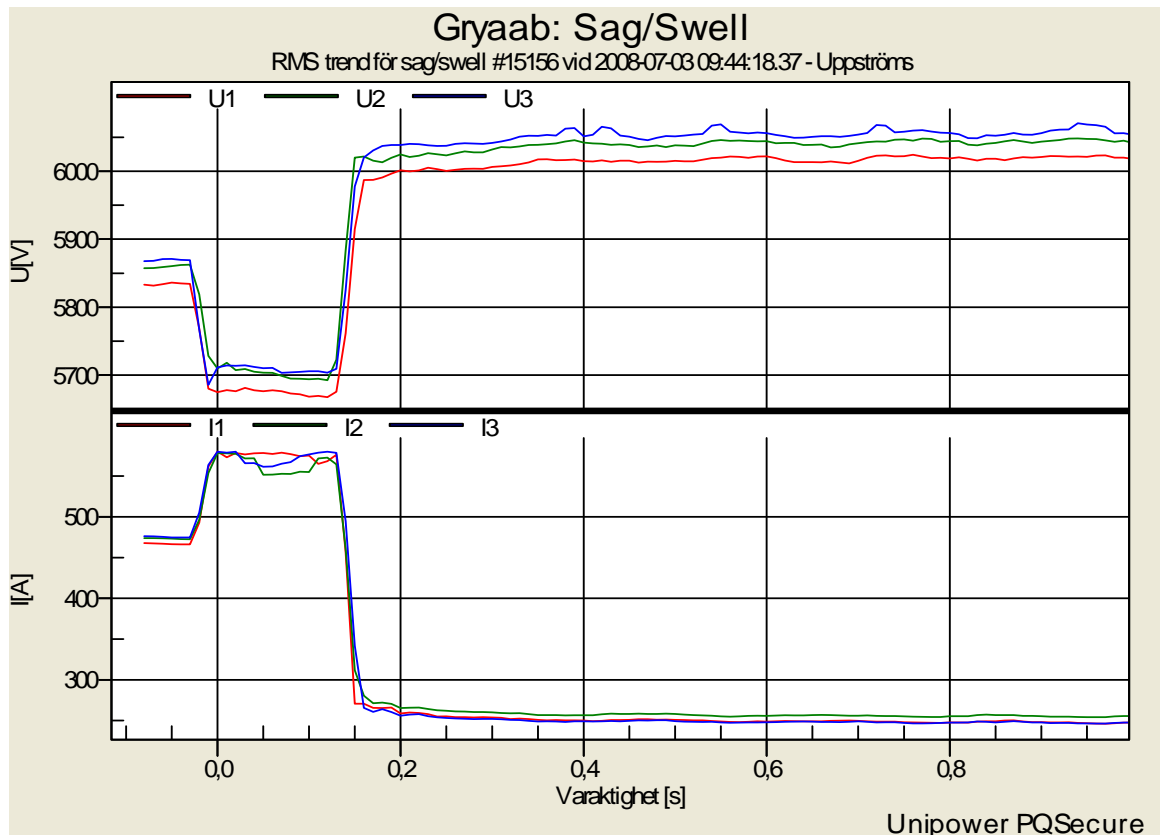
En typisk trefasig spänningsdipp registrerad i HSP01 på Gryaab ser ut som i figur 5.8.



Figur 5.7: Spänningsdipp med kvarvarande spänning på 65,37 % i fas 1 och varaktighet på 190 ms

Just när spänningsdippen inträffar ökar strömmen instinktivt i försök att kompensera för spänningssänkningen, men ger snart upp och sjunker. Därefter som spänningen höjs återhämtar sig även strömmen snabbt och vi får en liten oscillation på grund av induktansen och kapacitansen i elnätet. Spänningsdippen är inte genererad inifrån verket eftersom strömmen

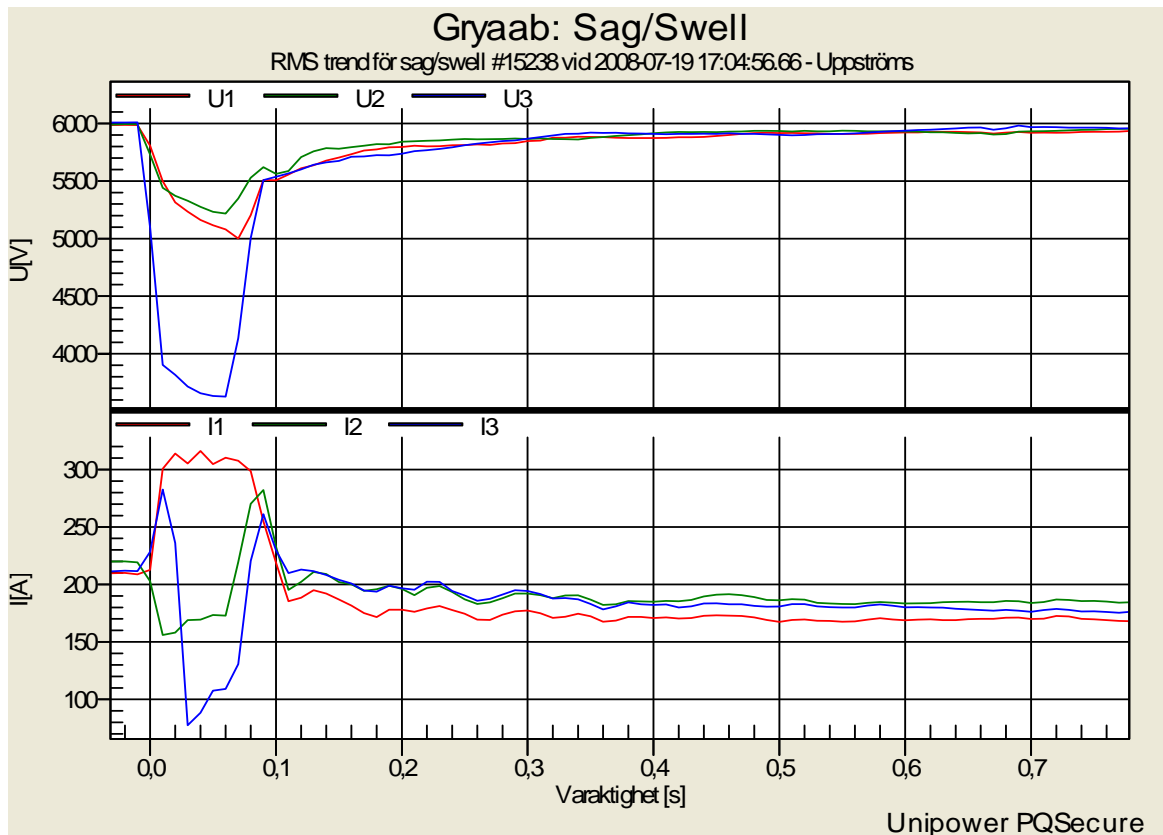
sjunker. I figur 5.8 däremot ökar strömmen så mycket att spänningen inte kan hållas uppe. Strömändringen ger en spänningsändring vilket är typisk för en dipp genererad nerifrån.



Figur 5.8: 94,37 % spänningsdipp på 160 ms

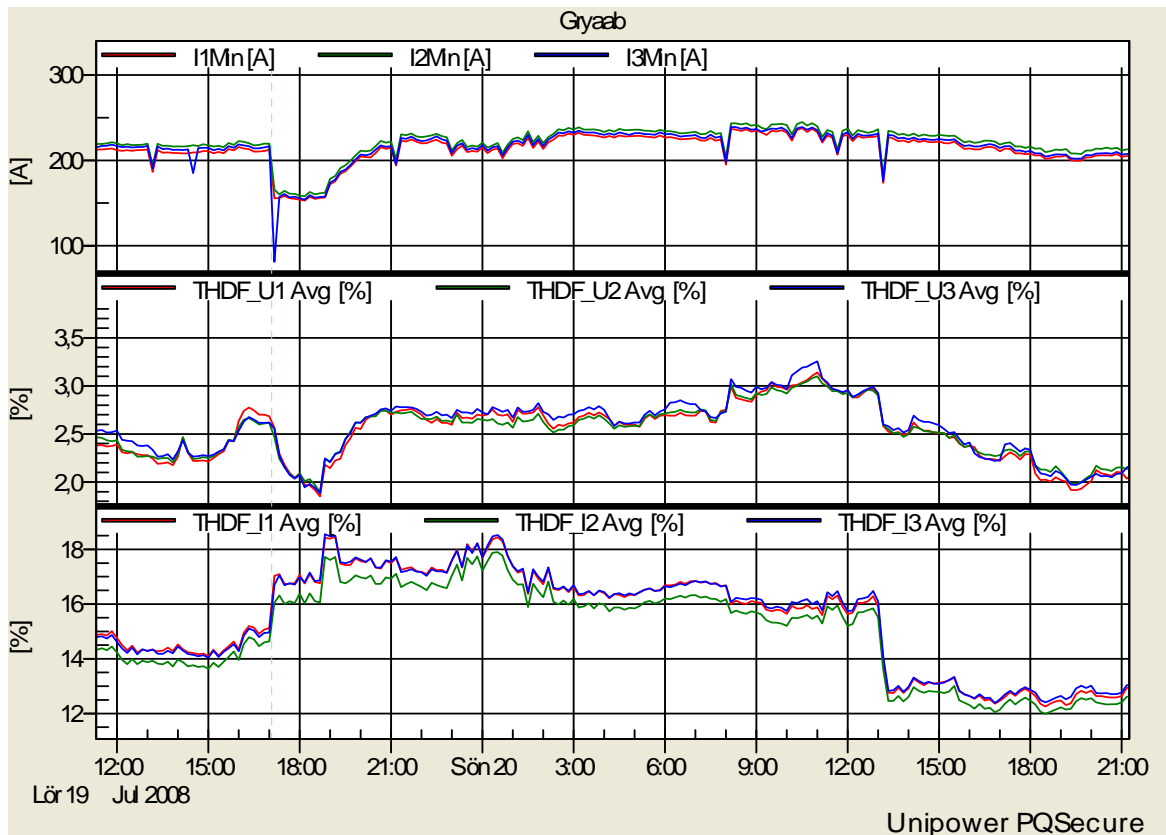
Dippen i figur 5.8 orsakades i samband med starten av induktionsmotor IN_PU3040. Då skovelhjulets vinkel var ofördelaktig, tvingades motorn dra maximal ström.

Den allvarligaste spänningssänkningen som har registrerats på Gryaab har en kvarvarande spänning på 61,42 % och varaktighet på 200 ms. Den registrerades på Gryaab som ett en-fas fel, men Göteborg energis registrerade data i K6 visar på två-fas fel. Deras registrerade kvarvarande spänning var på 69,9% och hade en varaktighet på 80 ms. Det här betyder att felet har inträffat närmare Gryaab (elektriskt) och att det kommer från 10 kV eller 70 kVs nätet. Men enligt Göteborg energis mätdata kommer dippen uppifrån och därmed är den troligen genererad på högre spänningsnivåer än så. I figur 5.9 är spänningsdippen presenterad.



Figur 5.9: Spänningsdipp med kvarvarande spänning på 61,42 % och varaktighet 200ms

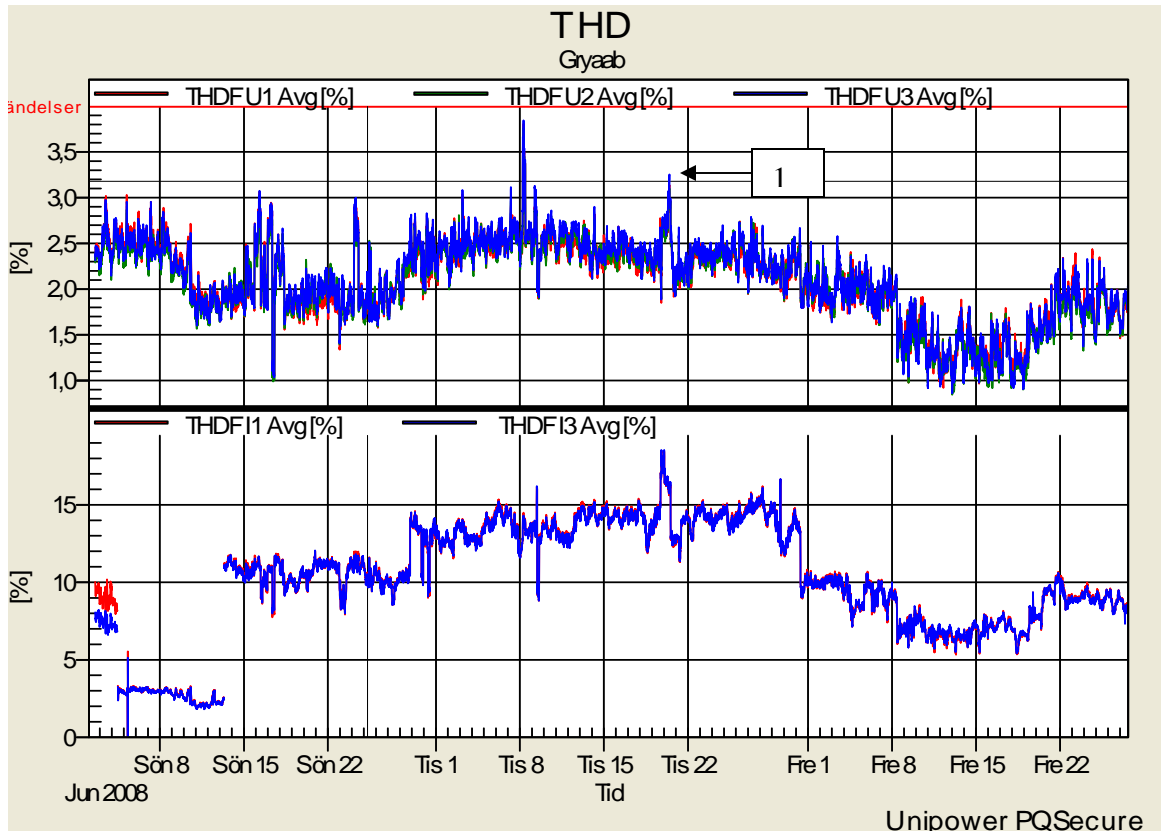
Enligt figuren är fas 3 den felande fasen. Spänningsdippen orsakade tripping av filter och motordrifter i HSP04. Bägge filtren i HSP04 löste ut, vilket drastiskt ökade övertonshalten i anläggningen. I figur 5.10 visas strömmens och övertonshaltens ändring i samband med att spänningsdippen inträffar.



Figur 5.10 Spänningsdipp på 61,42 % inträffar kl.17:04. Ström och övertonshalt i förbindelse med dippet.

Ifall en spänningsdipp löser ut motordriftarna kopplade till HSP04 ökar strömmens THD. Det beror på att strömmens 50 Hz komponent minskar. Spänningens THD däremot reduceras p.g.a. att de övertonsalstrande lasterna kopplas bort samt att spänningens 50 Hz komponent fortfarande är samma. I figur 5.10 finns en tydlig markering söndagen den 20 juli på att övertonshalten reduceras. THDI reduceras från 16 % till 13 % och THDU reduceras från 3 % till 2,5 %. Det förklaras av att bägge de aktiva övertonsfiltren i HSP04 kopplades in vid det här tillfället.

Under mätperioden löste säkringar på de aktiva övertonsfiltren ut ett antal gånger. En markerad ökning av övertonshalten i HSP01 registrerades den 13 maj och den 28 juni, det syns bäst hos strömmens THD i figur 5.10 och figur 5.11. Spänningens THD ökade från ett medelvärde på 2 % till ett medelvärde på ca 2,5 % medan strömmens THD ökade från ett avrundat medelvärde på 10 % till 15 %. När filtret kopplades in den 10 juni och den 31 juli fanns en tydlig markering av förbättring, se figur 5.9. Som nämnt ovan trippade bägge övertonsfiltren vid ett tillfälle, nämligen den 20 juli.



Figur 5.11 Övertenshalten från juni-augusti

I figur 5.11 ser vi hur THD varierar över tiden. Branta variationer uppstår då kraftiga ökning/sänkning hos strömmens och spänningens grundkomponent inträffar. T.ex. när reservkraften i form av gasmotorerna gick igång, sänktes övertenshalten. Eftersom verket producerade ström, minskade dess förbrukning från elnätet, då minskade strömmens grundkomponent i mätpunkten vilket i sin tur minskade strömmens totala övertenshalt.

Enligt figur 5.11 ökar spänningens övertenshalt drastisk tisdagen den 8 juli, övriga ändringar i flimmerhalt, spänningsändring eller strömförändring finns inte registrerad. P.g.a. det kommer förändringen troligtvis utifrån.

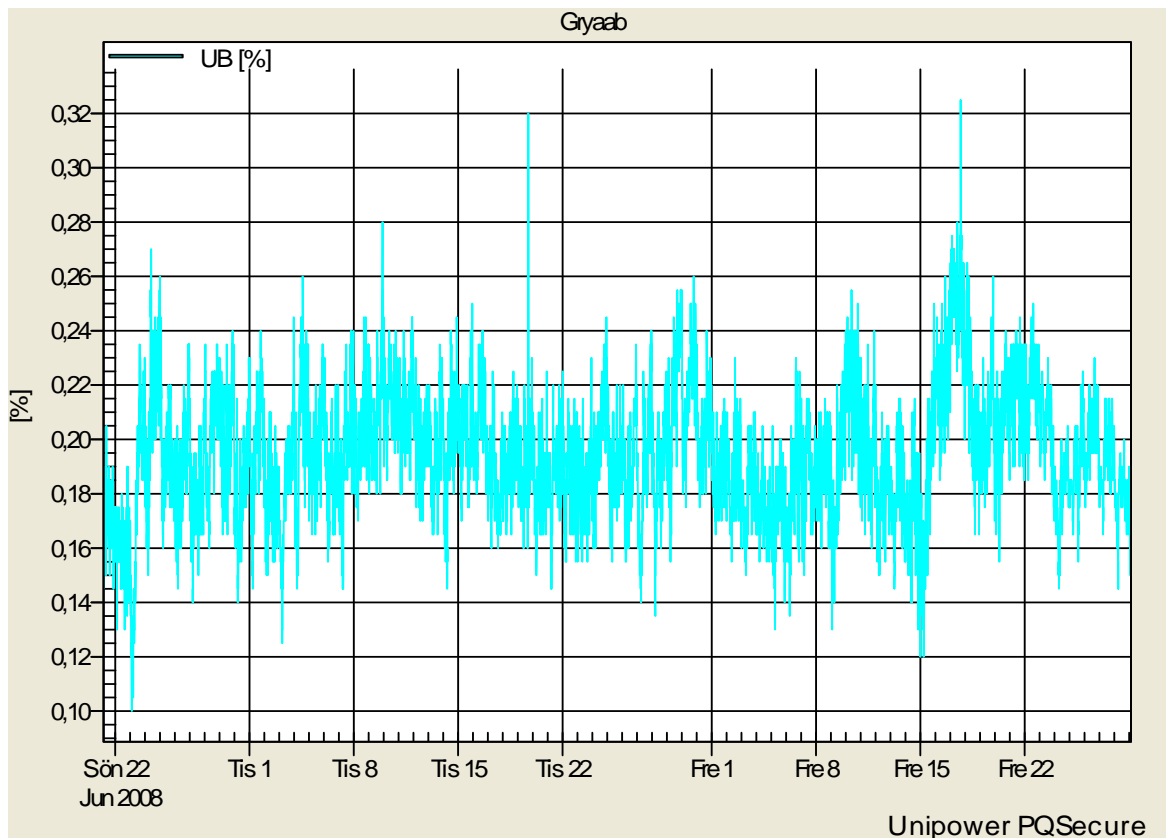
De framträdande individuella övertonerna uppmätta i HSP01 är den 5:e, 7:e, 11:e och 13:e med maximala värden på respektive 3.41 %, 1.77 %, 2.06 % och 1.43 %. I HSP04 var de framträdande övertonerna logiskt nog samma som i HSP01, alltså 5:e, 7:e, 11:e och 13:e med maximala värden på respektive 2.23 %, 1.35 %, 1.60 % samt 1.08 %.

Alla individuella övertoner och den totala spänningsdistortionen, THD uppfyller kraven på tillräckligt låg övertenshalt enligt europastandarden EN 61000-2-12 med god marginal då spänningens maximala THD inte får överstiga 8 %.

Spänningsobalans beräknas som kvoten mellan plusföljd och minusföljd enligt formel (6) i kapitel 2.4.4. Utifrån PQSecures medelvärden där plusföljden är på ca 6050 kV och minusföljden är på ca 12 V beräknas spänningsobalansen enligt:

$$U_b = \frac{\text{minusföjd}}{\text{plusföjd}} \cdot 100 = 0,2\%$$

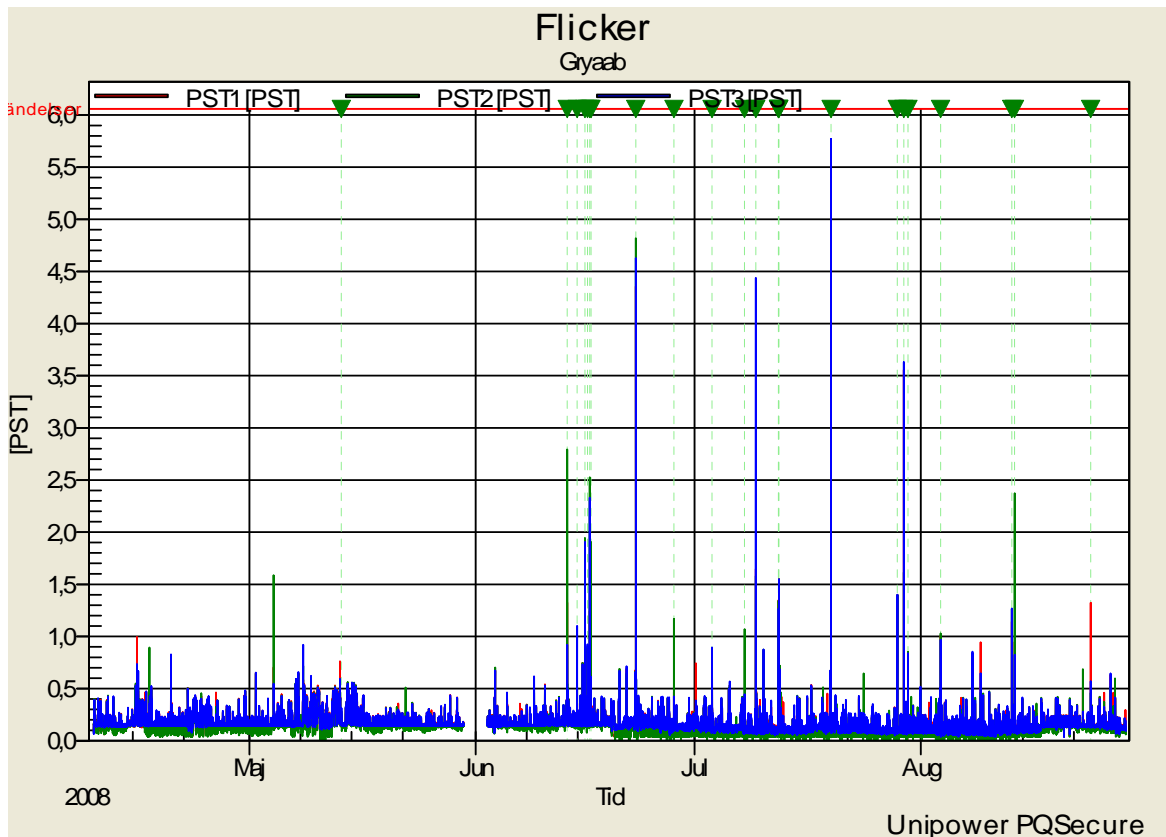
Det stämmer överens med grafen i figur 5.12.



Figur 5.12 Spänningsobalans I HSP01

Under 100 % av tiden får spänningsobalansen aldrig överskrida gränsvärdet på 2 %. I figur 5.12 konstateras att värdet understigs med hög marginal. De snabba höjningarna kan bero på spänningssänkningar, respektive spänningsökningar för snabba sänkningar.

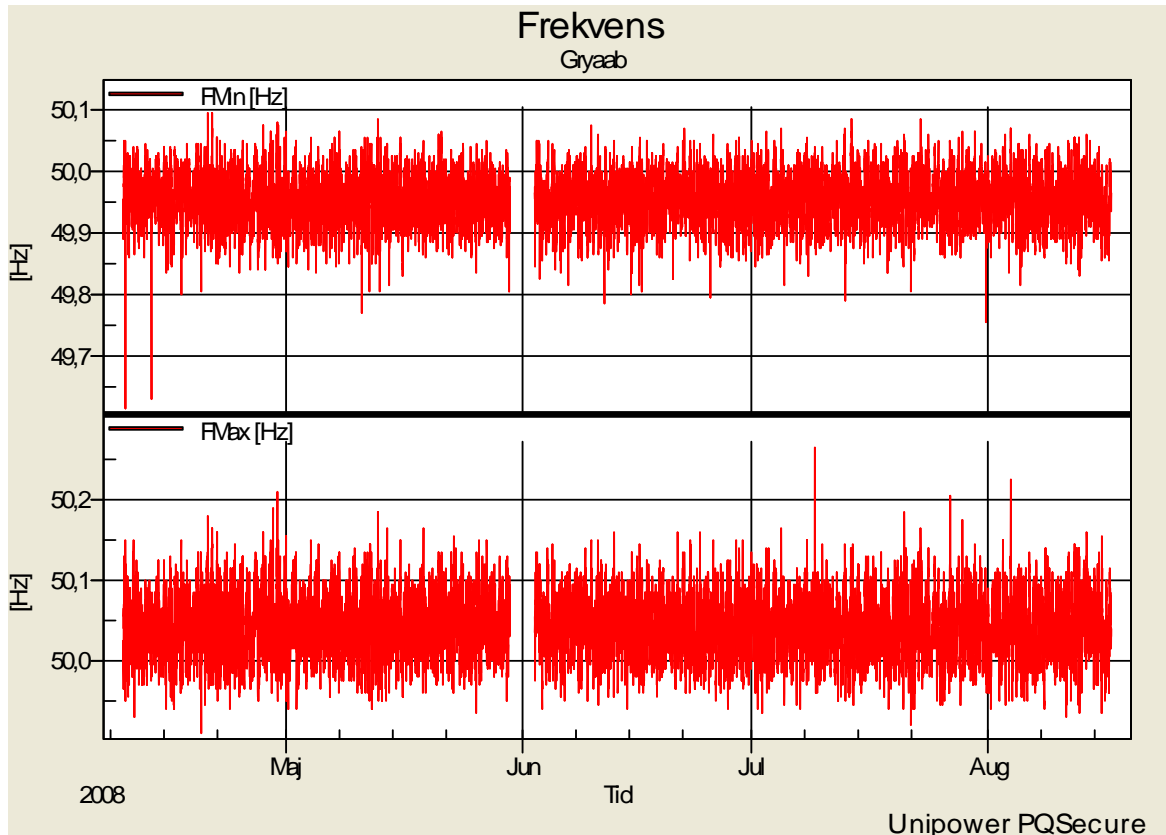
Flimmer beräknas utifrån spänningsförändringarnas frekvensinnehåll. Eftersom hjärnan är känsligare för variationer vid vissa frekvenser kan en liten förändring i känsligt område ge en hög flimmerparameter. Enligt normen får inte PLT överskrida 0,8 under normal drift och PST mätt under 10 minuter skall understiga 1,0. I figur 5.13 presenteras flimmerparametern PST mätt över hela mätperioden.



Figur 5.13 Uppmätta flimmerhalten under mätperioden

Från figuren ser vi att flimmerhalten överskrider gränsvärdet vid ett flertal tillfällen. De streckade gröna linjerna visar när spänningsdippar har inträffat. Och man kan se ett samband med ökade flimmerhalter då spänningsdippar inträffar.

Frekvensvariationerna på Gryaab har hållit sig inom gränsvärden på $\pm 1\%$ av grundfrekvensen 50 Hz. I figur 5.14 presenteras frekvens med avseende på tid under mätperioden.



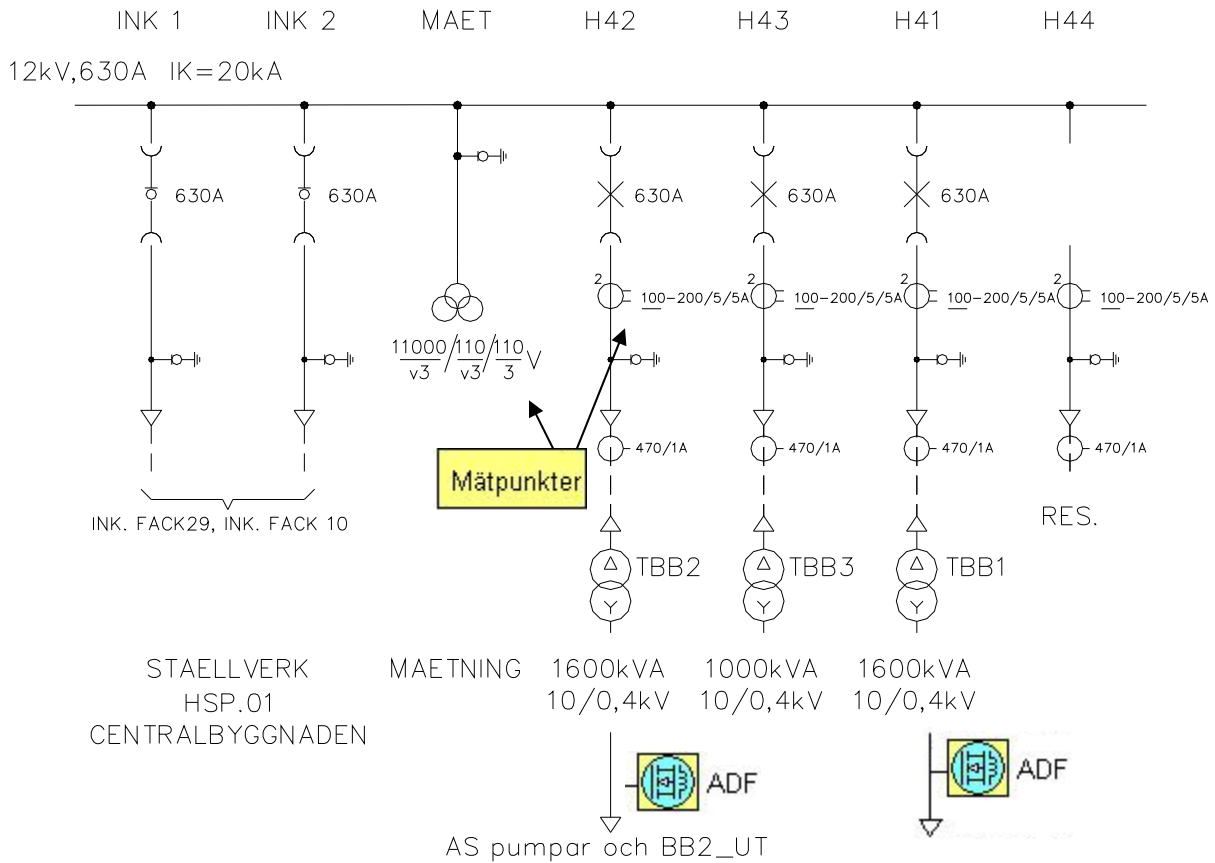
Figur 5.14: Frekvens under mätperioden April-Augusti

Från grafen i figur 5.14 har vi två minvärden på 49,60 Hz samt 49,63 Hz, registrerade den 9 april respektive den 13 april. Maxvärdet inträffade den 9 juli och låg på 50,26 Hz.

5.1 Mätningar och analys från HSP04

Anledningen till att det är intressant att studera elkvaliteten i biobäddsställverket är att problemen med dålig elkvalitet är tydliga här. Gryaabs största frekvensomriktare, på 90-200 kW, är nämligen matade från biobädden. Spänningssänkningar som trippar stora delar av drifterna skapar timmar med arbete då drifterna behöver återställas manuellt samt driftsätts gradvis under uppsikt.

I knappt två dygn samplades spänning och ström i 10,5 kV ställverket, HSP04. Spänningen mättes på skenan och strömmen mättes efter brytaren på utgående linje till transformator TBB2, se figur 5.15. Ett av ställverkets två aktiva filter är tillkopplade till primärsidan av denna transformator. Det andra filtret är parallellkopplat till transformator TBB1. Transformator TBB3 har inget aktivt filter eftersom lasten är liten och har få styrenheter. Mätenheten UP2210:an är beroende av plintars tillgänglighet för mätning, det saknades på TBB2:s sekundärsida och därför kunde inte mätningen genomföras där.

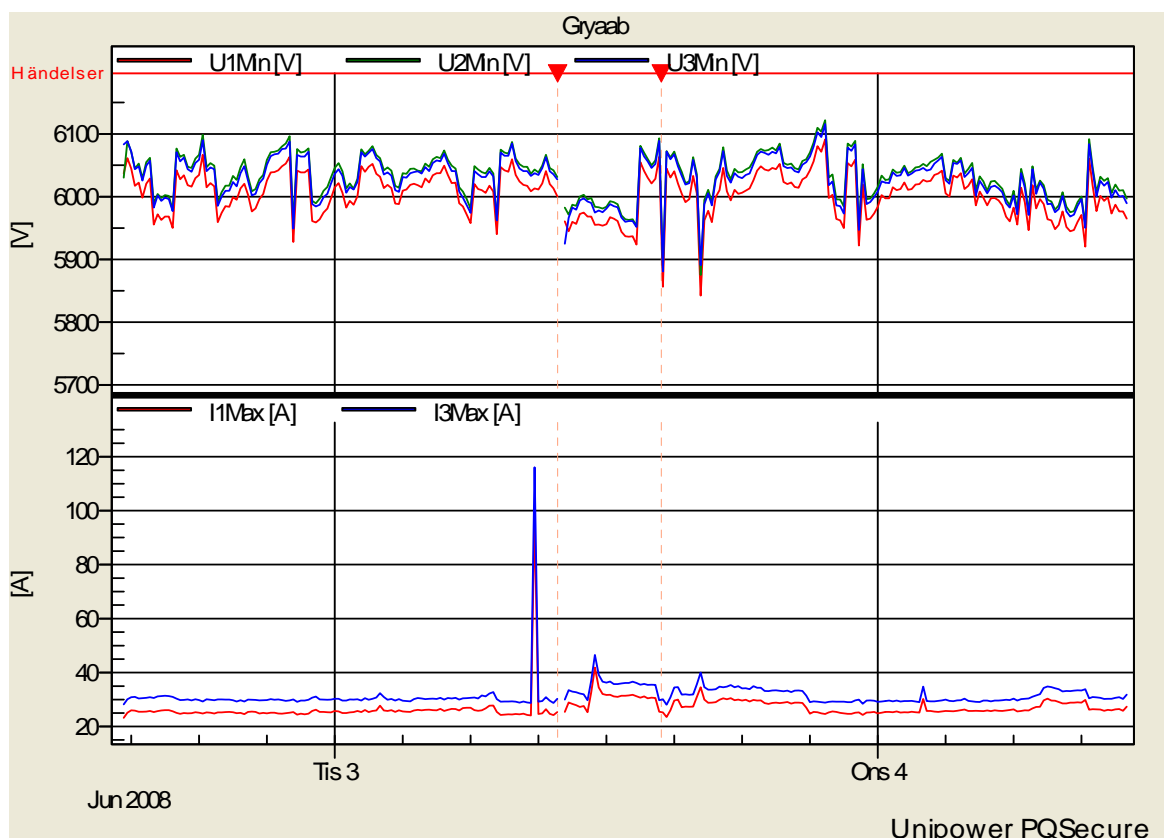


Figur 5.15. Enlinjeschema över biobäddsställverket HSP04. ADF står för Active Dynamic Filtering och i figuren visar de positionen av de aktiva filtren.

HSP04 består av sju fack varav två fack är för inkommande kablage från HSP01. Tre fack matar ut till (mestadels frekvensstyrda) motorer via DY transformatorer och de två resterande facken är mätfack respektive reserv. De aktiva filtren, ADF, i figuren är placerade på TBB1 och TBB2 eftersom transformatorerna i dagsläget matar den övervägande lasten från HSP04. I

samband med att Gryaab lägger till delar i reningsprocessen kommer matningsförhållanden i biobädden också att förändras. Lasten skall fördelas jämnare mellan transformatorerna. Det kan förbättra störningsbilderna.

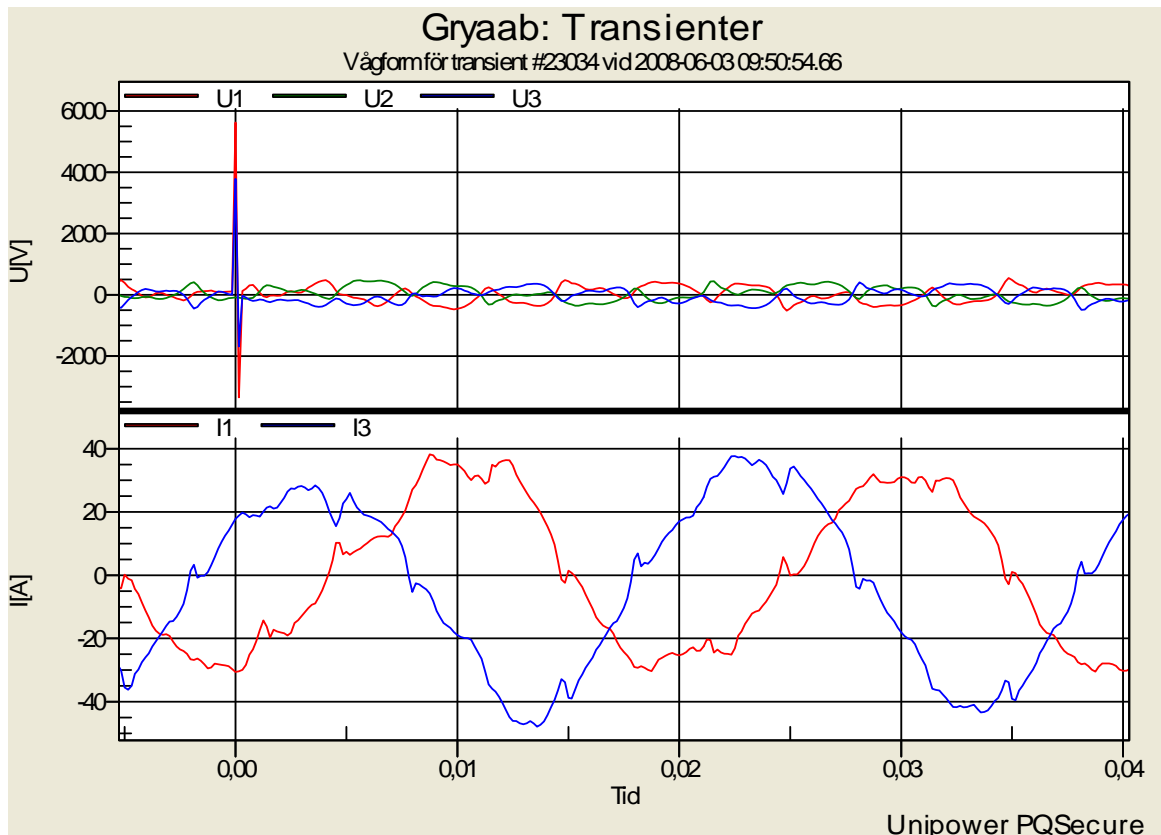
I figur 5.13 presenteras maximala RMS strömmar mätta på utgående linje till TBB2 i HSP04 och minimala RMS spänningar mätta på 10 kV skenan. Två transienter inträffades under mätperioden, dessa har markerats med röda streckade linjer i figuren.



Figur 5.16 Mätning av spänning på HSP04 samlingskena och mätning av ström i fack H42

Strömspiken i figur 5.16 torde bero på en lastinkoppling eller att lasten under mätpunkten började dra mer ström. Efter att ha kontrollerat TBB2s underliggande lasters effektförbrukning i delta V sågs inga underliggande laster dra mer ström vid denna tidpunkt. Det är märkligt, men man kan anta att det finns en last som inte är registrerad i Delta V eller att det kommer från andra laster över mätpunkten.

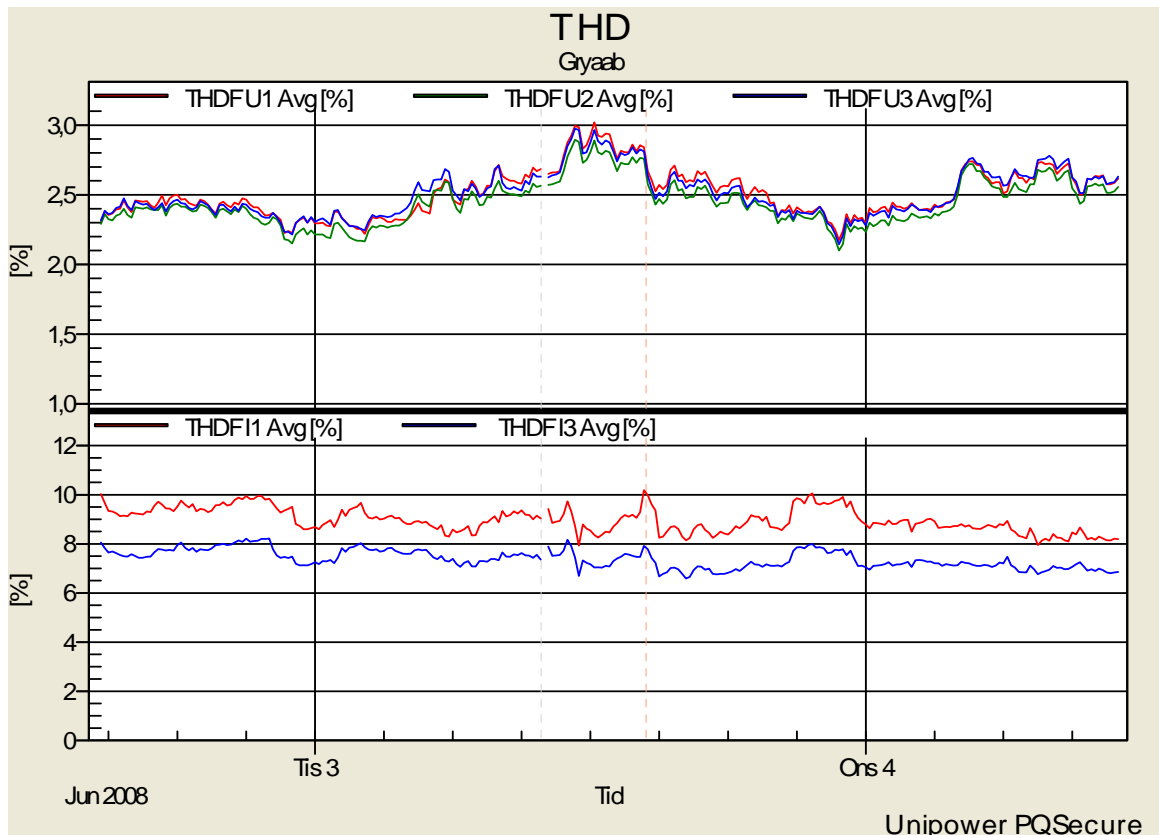
Enligt [5] påverkar transformatorns lindningssätt på hur spänningsdippen ser ut på sekundärsidan. I kapitel 2.4.5 finns en lista på hur spänningsdippen ser ut på sekundärsidan beroende på lindningstyp och spänningsdippens karaktäristik.



Figur 5.17 Händelseförloppet på en av transienterna som inträffade under mätningen i HSP04

Den övre grafen i figur 5.17 visar att övertonshalten efter transienten ökar. Den nedre kurvan visar strömmen som mäts på den utgående gruppen till TBB2. De dominerande individuella strömövertonerna domineras av 3:e, 5:e och 9:e övertonen med maxvärden på.

Spänningsdistortionen i HSP04 växlar mellan 2.5 % till 3 %, medan strömdistortionen ligger mellan 8 % - 10 %, se figur 5.18.



Figur 5.18 Överttonshalten i 10,5 kV ställverket HSP04

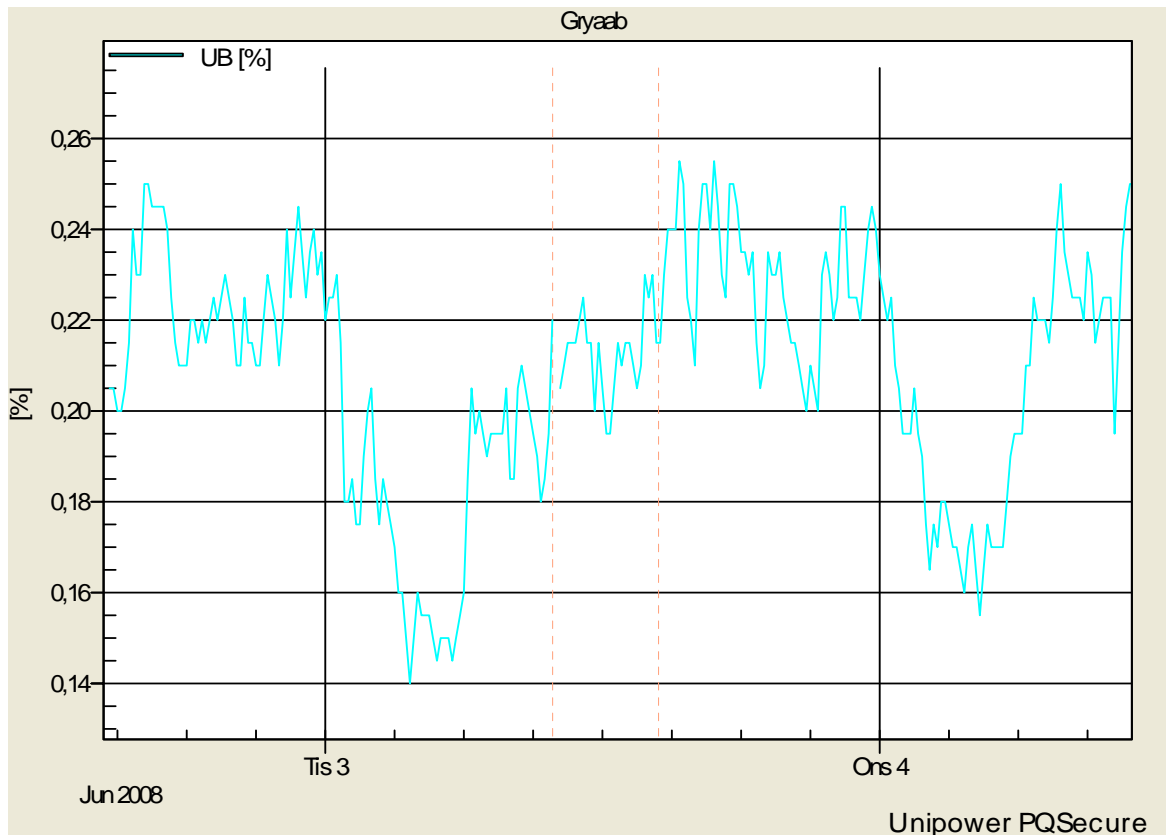
De streckade linjerna i figur 5.18 anger tiden då spänningstransienterna inträffade.

Alla individuella övertoner och den totala spänningsdistortionen, THD uppfyller kraven på tillräckligt låg överttonshalt enligt europastandarden EN 61000-2-12 med god marginal då spänningens maximala THD inte får överstiga 8 %.

Spänningsbalans beräknas som kvoten mellan plusföljd och minusföljd enligt formel (6) i kapitel 2.4.4. Utifrån PQSecures medelvärden är plusföljden på ca 6050 kV och minusföljden är på ca 12 V och då kan spänningsobalansen beräknas enligt:

$$U_b = \frac{\text{minusföljd}}{\text{plusföljd}} \cdot 100 = 0,2\%$$

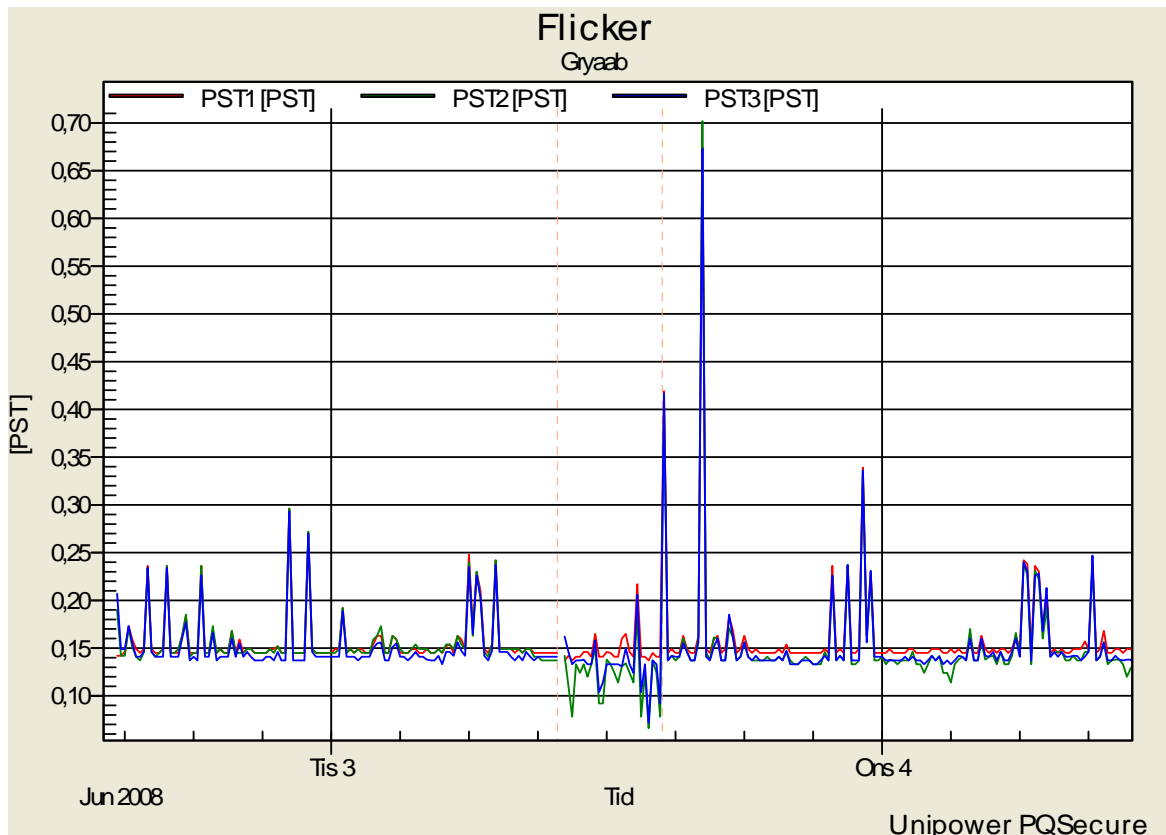
Det stämmer bra överens med grafen i figur 5.19.



Figur 5.19 obalans i spänningen i procent

Under 100 % av tiden får spänningsobalansen aldrig överskrida gränsvärdet på 2 %. Som vi ser i figur 5.19 växlar obalansen mellan 0,14 % och 0,26 % som är långt under gränsvärdet.

Enligt figur 5.20 uppfyller Flimmerhalten gällande normer som säger att under normal drift skall PLT understiga 0,8 och PST skall understiga 1,0 mätt under 10 minuter.



Figur 5.20 Uppmätt PST under mätperioden I HSP04

På grund av att flimmerparametern styrs av hur störande hjärnan uppfattar frekvensen är det inte alltid den djupaste transienten eller dippen som ger högst flimmerhalt. En liten spänningsförändring i en känslig frekvens kan ge en hög flimmerhalt. Den största flimmerstapeln beror på spänningssprång i en frekvens som är känsligt för ögat, se figur 2.14 i kapitel 2.8.1. Mer konkret vad som orsakar detta har inte kunnat fastställas.

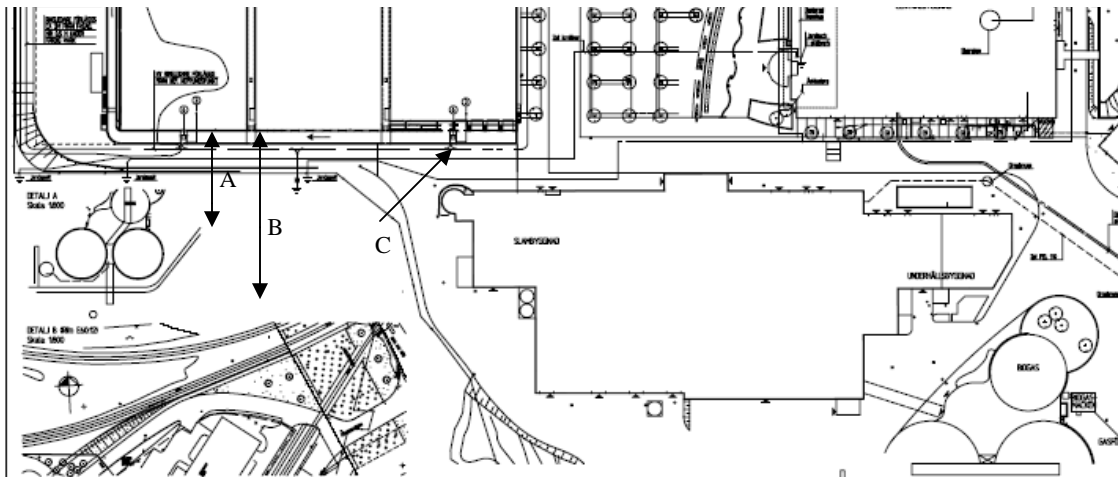
6 Mätning av jordtag och jordresistans

Större än hälften av Gryaabbs industriområde består av berg. Eftersom sten har hög impedans är jordningen mestadels utplacerad i Rya skog där marken består utav lera. Lera har bl.a. hög humiditet som minskar resistansen. Utifrån konstruktionsritningen över kablar i mark på Gryaab är det utplacerat 4 jordspett i Rya skog. Det finns även 1 jordspett nergrävd längs med järnbanan mitt emot skogen, samt 1 nyligen utplacerad jordspett i sprängstensmark i samband med den nya trafostationen vid inkörporten. Skyddsjordningen samt åskledarna i det explosionsklassade området runt biogasanläggningen är ett isolerat område, där ett flertal jordningspunkter omger byggnaden. Jordspetten är däremot nergrävda i sprängsten vilket betyder att jordimpedansen misstänks vara hög.

En tångamperemeter mätte den resulterande impedansen i jordkabeln genom att inducera likström på 200 mA i kabeln via kopparslingan i tången. Genom att mäta spänningen och strömmen får man ett mått på impedansen i kretsen. Instrumentet Hemegeo 15 användes till dessa mätningarna. I ett kontinuitetstest med sonder mättes den enskilde kabelns impedans genom en likströmsinduktion i kabeln. Här användes en Avo Megger DET5/4R. Alla mätningarna genomfördes av Stefan Kämpsten på YIT.

Den resulterande jordimpedansen runt biogasanläggningen mättes till 0,235 Ohm, vilket var extremt mycket lägre än väntat. Mätningen genomfördes på jordpunkterna runt biogascylinderna.

Den resulterande jordimpedansen uppmätt på jordbocken vid Rya skog var på 1,25 Ohm. Mätpunkten står angiven som C i figur 6.1. Med sondapparaten mättes en total impedans på 0,65 Ohm enligt YITs mätningar. I figur 6.1 markerar A avståndet 20 meter från jordbocken och ut i Rya skog, B anger avståndet 40 meter från jordbock och ut till Rya skog.



Figur 6.2 Översiktsbild över Gryaabbs sydvästra del, där bland annat Rya skog befinner sig.

7 Diskussion och slutsatser

Gryaabs elnät bedöms ha god elkvalitet under normala driftfall. Bedömningen görs utifrån uppmätta elkvalitetsparametrar i både centralställverket, HSP01, och biobäddens 10,5 kV ställverk HSP04. Individuella övertoner, THD, frekvensvariationer och spänningsobalans understiger gränsvärden satta i EMC normen EN 61000-2-12 med god marginal. Motsättningen ligger i att det finns områden på verket som ofta drabbas av lastbortfall då spänningsvariationerna blir för kraftiga. Detta är frekvensomriktare, aktiva filter och motorer matade från biobäddsanläggningens ställverk HSP04. Mätdata konstaterar att flertalet av biobäddens omriktare trippar då spänningen i matningspunkten är lika med eller understiger 75,47 % och har varaktigheten 190 ms.

Tjugoen spänningsdippar inträffade under mätningen varav fyra hade en kvarvarande spänning på 60 % - 75 % och varaktighet mellan 100-200 ms. Dessa fyra dipparna trippade motordrifterna i HSP04. En jämförelse mellan Gryaabs mätdata och spänningsdipparna registrerade av Göteborg energis mätenhet i ställverket K6 Repesäll, visar att alla dipparna under 90 % genereras på högre spänningsnivåer än 10 kV. Troligen orsakas flertalet dippar under 90 % av fel på 130 kV sidan [13].

Den största nackdelen ur Gryaabs perspektiv är att de djupa spänningsdipparna resulterar i att delar av anläggningen stannar och måste driftsättas inom kort tid. Kraven på hur snabbt delarna måste återställas beror på vattenmängden som pumpas in till reningsverket. I värsta fall handlar det om en timme och i bästa fall ett dygn. Filtren och frekvensomformarna som löst ut måste manuellt startas om igen. Återställningsarbetet tar ofta upp till 3-4 timmar i det totala, eftersom uppstarten av måste ske gradvis och den kemiska processen med fosfor och kväverening kan bli för sned och måste åtgärdas.

Av totalt 58 registrerade spänningstransienter i HSP01 orsakas 56 av att ställverksbrytaren till induktionsmotorn till inloppspump IN_PU4040. Bakgrunden till varför dessa registreras och inte övriga inloppspumpar beror troligen på att svängningen mellan induktansen och kapacitansen hos IN_PU4040 är högre i mätningpunkten. Den beror på att motorns kondensatorbatteri är tillkopplad i ställverket och inte direkt vid motorn som hos övriga inloppspumpar. Inga transienta underspänningar registrerades i HSP01 i samband med att IN_PU1040, IN_PU2040 eller IN_PU3040 kopplades in. Däremot registrerades två transienter i HSP04 i samband med tillkopplingen av IN_PU2040 och IN_PU3040. Under den här mätperioden kopplades varken IN_PU1040 eller IN_PU4040 in, men man kan misstänka att även dessa genererar spänningstransienter i HSP04. Anledningen till varför tillkopplingen av IN_PU2040 och IN_PU3040 ger transienter i HSP04 och inte i HSP01 kan vara att källinduktansen och kapacitansen är större närmare lasten (motorerna).

Vidare så borde det nämnas att omkopplingar i HSP01 ger höga strömspikar. Ifall utbyte av brytare blir aktuellt, borde dessa skiftas till styrbara brytare såsom synkroniserade brytare, dessa känner av och reglerar så att brytaren kopplar i nollgenomgången. Konsekvenser av strömspikarna är slitage av material och apparater i viss utsträckning.

Något att ha i baktanke är att spännings-sänkningar/ökningar och transienter kan förstärkas längre ner i elnätet eftersom lokala kapacitanser och källimpedanser såsom transformatorer och

filter kan förstärka självsvängningen orsakade av kopplingar på distributionsnivå. Då är det så att den primära resonansen förstärks i lastpunkten.

De negativa spänningstransienterna trippar aldrig frekvensomriktarna i biobädden. Orsaken till det är att transienten har ett snabbt förlopp på 156,6 us, lång stigtid samt för liten amplitud. Kondensatorbatteriet i omriktaren klarar av att hålla upp energin till motorn under den korta tiden tills spänningen återtar sin normala form. De elektriska komponenterna i frekvensomriktaren riskerar att slitas ut i förtid på grund av de högfrekventa störningarna. Det är också oklart hur transienter fortplantar sig i transformatorerna.

Ytterligare en faktor till varför biobäddens motorer och frekvensomriktare trippar, är dess storlek. Större frekvensomriktare innehåller större kondensatorbatteri i mellanspänningsledet. Kondensatorbatteriet är frekvensberoende och eftersom stora kondensatorbatterier innehåller mer energi än mindre batterier laddar de ur snabbare.

För att komma åt problemet med spänningssänkningarna behövs en snabbreagerande kompensation. Dynamiska spänningsstabilisatorer använder sig av en boost-transformator för att injicera den saknade spänningen i en spänningsdipp. Det finns ett antal företag såsom ABB, och Unitrafo som tillverkar spänningsstabilisatorer med skillnader på konstruktionen och komplexiteten. En spänningsstabilisator reglerar både för spänningsökningar och spänningssänkningar och obalans, och i vissa applikationer kompenseras även för eventuella fel i fasvinkeln. I dagsläget är detta en kostsam och troligen en olönsam lösning för Gryaab med tanke på hur sällan dipparna inträffar och hur liten andel av andra störningar som existerar eller skapar problem. Bästa lösningen ur Gryaabs perspektiv är att dokumentera störningar och fel samt upprätthålla god kontakt med elleverantören Göteborg energi och få tillräckligt med information om nätet och driften av det.

8 Fortsatta studier

Eftersom utbyggnader av Gryaab ständigt pågår kan det vara intressant att ta fram en simuleringsmodell för att studera hur ändringar kan påverka Gyaabs elnät. Då kunde man simulera och konstruera förbättringar i elnätet. T.ex. hade det varit spännande att se skillnader genom användandet av olika typer brytare, mjukstartare, frekvensomriktare, filter och motorer.

Det hade också varit intressant att studera elkvaliteten på flera ställen samtidigt. På lågspänningssidan av HSP04 är störningarna komplexa och det hade varit intressant att mäta där samtidigt som man mäter på 10 kV sidan i HSP01. Hur utbreder sig störningarna? Eftersom det här examensarbetet har fokuserat på relativt lågfrekventa ledningsbundna störningar kunde en mer ingående analys av de högfrekventa och icke ledningsbundna störningarna vara nödvändigt.

Åsk- och jordsystemet samt potentialutjämningen är viktig för att elkvaliteten skall upprätthållas. En mer ingående analys av detta kan göras för att kontrollera och säkerställa att systemet är optimalt.

9 Källförteckning

- [1] Kurskompendium EEK215 Power quality and EMC, Mars 2007, examiner: Tuan A. Le, edited by Math Bollen and Ambra Sannino, Chalmers University of Technology, department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering
- [2] Nya lösningar för bättre elkvalitet, ABB
[http://www02.abb.com/global/seitp/SEITP161.NSF/viewunid/CE6956CAC869FEE6C1256DDD003A2099/\\$file/Elkvalitet.pdf](http://www02.abb.com/global/seitp/SEITP161.NSF/viewunid/CE6956CAC869FEE6C1256DDD003A2099/$file/Elkvalitet.pdf)
- [3] Elmiljö i praktiken, Utgiven 2007, Skriven av Leif Westerlund och Glerups Utbildning AB
- [4] Utdelat material i kursen biologiska effekter av elektromagnetiska fält, SSY110 - Bioelectromagnetics
http://www.student.chalmers.se/hp/hp/?hp_id=4586&hp_view=handout&path=Lectures
- [5] Understanding power quality problems –voltage sags and interruptions, skriven av Math H. J. Bollen, Chalmers University of Technology Gothenburg, Sweden, utgiven av IEEE press series on Power Engineering, P. M. Andersson, series editor, the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York
- [6] High Frequency Conducted Disturbances, technical report no 934L, skriven av Anna Tjäder, publicerat på Chalmers Bibliotek, reproservice, Göteborg; Sweden 2004
- [7] Kompendiumguide om driftstopp på uppdrag av Elforsprojektet ”Kunskapsplats elkvalitet”, sammanställt av Sven-Erik Berglund, SEB-Elkonsult, Rejdar Gustavsson, NORDBO kraftteknik AB, Gunnar Englund, GKE Elektronik AB och John Akerlund, Avbrottsfria Kraftnät UPN AB, Stockholm i november 2004, Åke Sjödin, Projektledare, Elforsk
- [8] Electrical Power Systems Quality, second edition, skriven av Roger C. Dugan, Mark. F. McGranaghan, Surya Santoso och H. Wayne Beaty, publicerad av McGraw Hill companies, 2002
- [9] <http://www.omniverter.com/calculator.html>
- [10] UPS system med svänghjul konstruktion: UPS Flywheel Technology Move Over, Batteries
<http://www.processor.com/editorial/article.asp?article=articles%2Fp2639%2F32p39%2F32p39.asp>
- [11] About flicker measurement methods for calculation of the direction to a flicker source:

http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?tp=&arnumber=1610687&isnumber=33825

- [12] Göteborg den 11 augusti 2008: Ett 10 poängs examensarbete: EMC problematik och elkvalitet i elkraftnät, skriven av Sugulle, Abdirashiid för Växjö universitet april 2006, rapport nr 06039
www.diva-portal.org/diva/getDocument?urn_nbn_se_vxu_diva-519-2_fulltext.pdf

- [13] Examensarbete: Spänningsdippar - spänningsdippskaraktäristik i en knutpunkt till följd av fel i omgivande nät, skriven av Ilijaz Kenjar & Maria Olsson för institutionen för elteknik på Chalmers tekniska högskola i Göteborg år 2003, examensarbete 77E
<http://webfiles.portal.chalmers.se/et/MSc/Kenjar&OlssonMSc.pdf>

- [14] Datablad om asynkronmotorer från STRI
<http://www.stri.se/public/Asynchronous-motor.pdf>

- [15] Straight talk about PWM AC drive harmonic problems and solutions
<http://www.ab.com/drives/techpapers/Harmonicsbasics.pdf>

- [16] <http://www.abb.se/cawp/seitp161/5be0ce720200eaf7c1256d830031fbbc.aspx>

- [17] <http://en.wikipedia.org/wiki/Aliasing>

- [18] Application notes for variable speed drives
http://www.reo.co.uk/files/reo_unity_1.pdf

- [19] Fakta om asynkronmotorer
http://en.wikipedia.org/wiki/Asynchronous_motor

10 Bilaga

I bilagan finns tabeller, bilder och beskrivningar av apparater som inte har kunnat tilldelas plats i rapporten.

10.1 Registrerade spänningsdippar hos Gryaab och Göteborg energi

Alla registrerade spänningsdippar på Gryaab och K6 av Göteborg energi har sitt ursprung från fel på högre spänningsnivåer än 10 kV, enligt mätdata. I tabellen nedan presenteras en jämförelse över alla registrerade spänningsdippar på Gryaab och K6 som ligger runt 90 % eller lägre.

Gryaab					K6, Göteborg energi		
Datum	Klocka	U [%]	Faser	Varaktighet [ms]	U [%] hos GBG energi	Faser	Varaktighet [ms]
13-jun	13:23:11	83,23	3-fas	90	84,1	3	71
15-jun	23:33:58	86,94	3-fas	130	87	3	60
16-jun	08:01:48	91,14	3-fas	860	Ingen registrering (Inställt på 90%)		
16-jun	14:57:24	83,33	2-fas	160	80	3	100
16-jun	19:29:19	89,17	1-fas	70	Ingen registrering (Inställt på 90%)		
22-jun	22:55:04	65,37	3-fas	190	64,6	3	120
09-jul	09:23:52	71,83	1-fas	100	77,3	2	80
12-jul	13:30:56	89,89	3-fas	130	89,8	3	50
19-jul	17:04:56	61,42	1-fas	200	69,9	2	80
28-jul	19:12:31	91,96	3-fas	80	Ingen registrering (Inställt på 90%)		
29-jul	16:24:13	75,47	2-fas	190	70,6	3	160
13-aug	11:48:06	91,55	3-fas	120	Ingen registrering (Inställt på 90%)		
13-aug	20:52:01	85,89	1-fas	150	87,8	2	100
24-aug	07:08:50	92,82	1-fas	140	Ingen registrering (Inställt på 90%)		

10.2 Spänningsstabilisatorer

10.2.1 Unitrafo spänningsstabilisator

Följande varianter finns:

- 1-fas (STC-serien) upp till 200 kVA
- 3-fas (STC-T-serien) för balanserade laster upp till 600 kVA med en unik reglering av genomsnittsspänningen på de tre faserna
- 3-fas (STC-Y-serien) för obalanserade laster upp till 600 kVA med individuell reglering för varje fas och med krav på neutral ledare på ingångssidan

Om så önskas är det möjligt att på beställning utrusta varje stabilisator med en isolertransformator för att garantera

galvanisk separation av lasten och även uppnå god dämpning av transienter mm, en så kallad "Line Conditioner".



Primärspänning: 400V

Frekvens: 50-60Hz

Sekundärspänning: $400V \pm 1,5\%$

Reaktionshastighet: $25 \div 40 \text{ msV}$

Okänslighet mot last- och effektvariationer:

konstant

Maximal tillfällig överlast: $10 I_n$

Överlast: 10%

Kompenserar för spänningsvariationer $\pm 30 \%$

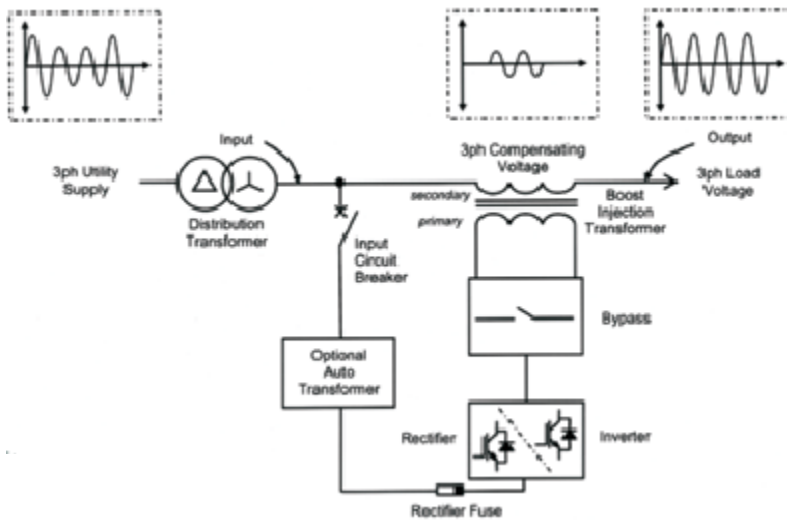
Verkningsgrad vid full last: 98 %

Omgivningstemperatur: $-10 - +40^\circ\text{C}$

Maximal obalans: 50%

10.2.2 ABB:s spänningsstabilisatorer

ABB:s mest avancerade spänningsstabilisator AVC₂



Den kompenserar fullt ut för 3-fas spänningsdippar ner till 70 % kvarvarande spänning samt enfasspänningar ner till 55 % av kvarvarande spänning.

3-fas dippar ner till 30 % och 1-fas dippar ner till 0 % kompenseras delvis.

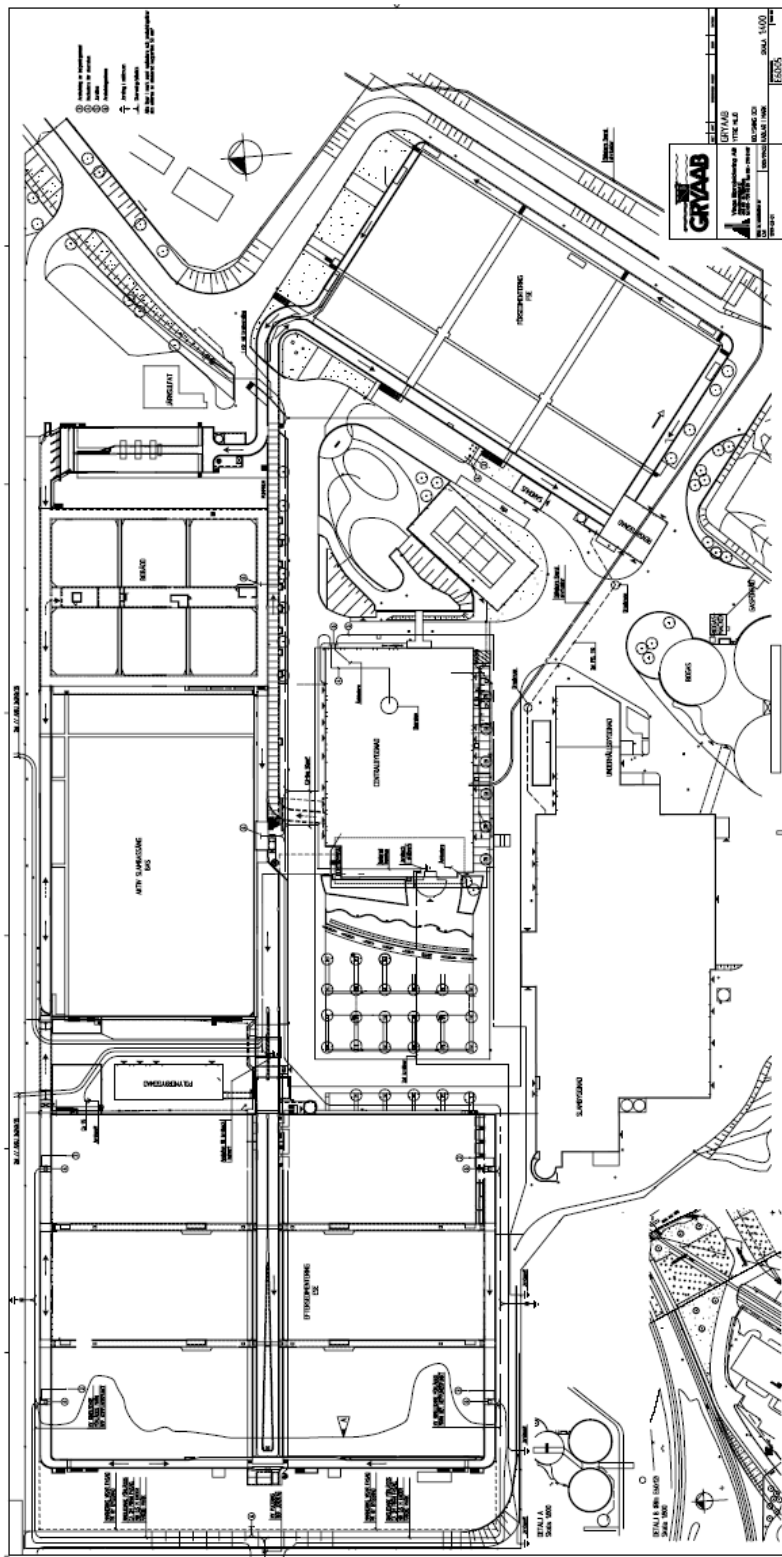
Fasvinkel hopp på matande spänning korrigeras samt obalans.

AVC2 är ständigt Online för att förbättra elkvaliteten och kan kopplas upp mot ethernet.

Reaktionshastigheten ligger under 20 ms.

AVC2 kompenserar också för spänningsökningar och den innehåller en datalogg med fel och händelselista. Spänningsstabilisatorn är också skyddad mot kortslutningar.

10.3 Planritning över Gryaab med jordkabel i mark



10.4 Standard EN 61000-2-12

Frekvens

Kompatibilitetsnivån för frekvens är +/- 1 % av 50Hz

Spänningsobalans

Under normal drift, dvs 100% av tiden skall minustörelsspänningens medel-RMS ligga inom ramen 0% till 2% av plusstörelsspänningen.

Flicker

Under normal drift skall PLT understiga 0,8. PST mätt under 10 minuter skall understiga 1,0.

THD

Under normal drift skall THD understiga 8 %

Individuella övertoner

Medel-RMS för varje överton får inte överstiga följande värden

Gränsen anger procent av nominell spänning

2: 2%	15: 0,4%	28: 0,339%	41: 0,671%
3: 5%	16: 0,406%	29: 1,061%	42: 0,31%
4: 1%	17: 2%	30: 0,333%	43: 0,627%
5: 6%	18: 0,389%	31: 0,975%	44: 0,307%
6: 0,5%	19: 1,761%	32: 0,328%	45: 0,2%
7: 5%	20: 0,375%	33: 0,3%	46: 0,304%
8: 0,5%	21: 0,3%	34: 0,324%	47: 0,551%
9: 1,5%	22: 0,364%	35: 0,833%	48: 0,302%
10: 0,5%	23: 1,408%	36: 0,319%	49: 0,518%
11: 3,5%	24: 0,354%	37: 0,773%	50: 0,3%
12: 0,458%	25: 1,274%	38: 0,316%	
13: 3%	26: 0,346%	39: 0,2%	
14: 0,429%	27: 0,2%	40: 0,312%	

10.5 Teknisk beskrivning av Unipowers mätinstrument

Spänningsingångar

Kanaler	4 differentiella ingångar
Spänningsnivå	0-275V RMS
Transientnivå	+/- 1500V toppvärde (peak nivå)
Upplösning	14 bitar (84dB)
Samplingshastighet	6,4kHz (7,7kHz i 60Hz system)
Störningsdetektering	Snabba transienter (> 1µs), sag/swells och korta avbrott
Ingångsimpedans	2MΩ
Bandbredd	3,2kHz för rms-baserade parametrar (3 Mhz för transienter)

Strömingångar

Kanaler	4 differentiella ingångar
Strömnivå	0-6A RMS
Upplösning	14 bitar (84dB)
Samplingshastighet	6,4kHz (7,7kHz i 60Hz system)
Ingångsimpedans	10mΩ
Bandbredd	3,2kHz

Digitala ingångar

Kanaler	7 st
Ingångsnivå	0-250V DC. Låg nivå <5V, hög nivå >20V

Digitala utgångar

Kanaler	2 st solid state
Drivning ut	max 100 mA

Mätnoggrannhet

Uppfyller klass A enligt IEC 61000-4-30:2003 vilket bl.a. innebär att osäkerheten vid spänningsmätning är max ± 0.1 %.

För maximal noggrannhet synkroniseras mätenheten till nätfrekvensen via en faslåsnings (phase-locked loop - PLL).

Enheten är försedd med anti-aliasfilter enligt IEC 61000-4-7.

Sampling

Frekvensområdet är 45–65 Hz. Samplingsfrekvensen är 6400 Hz – 12800 Hz för 50 Hz system och 7680 Hz – 15360 Hz för 60 Hz system. Inbyggda peakdetektorer för alla spänningskanaler, detekterar transienter ner till 1 µs.

Minneskapacitet

4Mb (8Mb som option) Inbyggt flash-minne för mätdata. Ingen hårddisk eller andra rörliga delar.

Standarder

Uppfyller klass A enligt **IEC 61000-4-30:2003**

Uppfyller klass I enligt **IEC 61000-4-7:2002**.

Uppfyller **IEC 61000-4-15:2003** (f.d. IEC 868)

Uppfyller krav för mätningar enligt **EN 50160** och **SS421 18 11** för Spänningskvalitet

UP-2210 är utvecklad för att uppfylla

EN 61010-1 Säkerhet

UP-2210 är CE-märkt och uppfyller därmed kraven för EMC enligt:

EN 50081-1,2 och IEC 61000-6-4 Emission

EN 50082-1,2 och IEC 61000-6-2 Immunitet

Kalibrering och självttest

För att försäkra sig om högsta tillförlitlighet utför UP-2210 regelbundet självttester under pågående mätning.

Unipower rekommenderar att kalibrering av UP-2210 sker med 24-månaders intervall.

Störningsdetektering

Transienter

Snabba transienter med varaktighet ner till 1 μ s detekteras simultant på all fyra spänningskanaler. Alla åtta kanalernas kurvform kommer att lagras då en störning inträffar på en kanal. Kurvformen lagras så att en period före händelsen och fyra perioder efter händelsen lagras. UP-2210 kan lagra upp till 50 st transienter med ett standard minne på 4MB, och upp till 100 st transienter med 8MB minne.

Sags/Swells

Detekteringen av RMS sags/swells sker på de fyra spänningskanalerna. RMS värdet på alla åtta kanaler lagras under upp till 2,5 sekunder. Kurvformen lagras så att 5 perioder före händelsen och 120 perioder efter händelsen finns med. Detta visas sedan som en trendgraf. UP-2210 kan lagra upp till 98st 1.3 sekunders sags/swells med ett standard minne på 4MB, och upp till 195st sag/swells med 8MB minne. För 2.5 sekunders inspelningstid gäller upp till 50st sag/swells med 4MB minne och upp till 100st sag/swells med 8MB minne.

Felskrivarinspelning

De digitala ingångarna kan trigga felskrivarinspelningar med inställbar tid. Kurvformen och/eller rms-värdet från alla åtta kanalernas spelas in. För 4 sekunders inspelningstid och 600 Hz sampling rymmer standardminnet (4 MB) upp till 8 st vågformsinspelningar eller upp till 50 st rms-värdesinspelningar. Med 8 MB minne dubblas kapaciteten.

UPPMÄTTA OCH BERÄKNADE PARAMETRAR

UP-2210 mäter och beräknar en mängd olika parametrar kontinuerligt. Efter ett *lagringsintervall* lagras de nedan beskrivna parametrarna. Lagringsintervallet kan ställas godtyckligt mellan 3 sekunder och flera timmar. Varje grupp av parametrar kan ha olika lagringsintervall.

Spänningsparametrar

Spänningen mäts kontinuerligt enligt normen IEC 61000-4-30 klass A

Parameter	Beskrivning	Kanal
U1Ave	Spänningens RMS under hela lagringsintervallet	1
U1Min	Spänningens lägsta RMS under intervallet $U_{rms} (\frac{1}{2})$	1
U1Max	Spänningens högsta RMS under intervallet $U_{rms} (\frac{1}{2})$	1
U2Ave	Spänningens RMS under hela lagringsintervallet	2
U2Min	Spänningens lägsta RMS under intervallet $U_{rms} (\frac{1}{2})$	2
U2Max	Spänningens högsta RMS under intervallet $U_{rms} (\frac{1}{2})$	2
U3Ave	Spänningens RMS under hela lagringsintervallet	3
U3Min	Spänningens lägsta RMS under intervallet $U_{rms} (\frac{1}{2})$	3
U3Max	Spänningens högsta RMS under intervallet $U_{rms} (\frac{1}{2})$	3
UNGAve	Spänningens RMS under hela lagringsintervallet	4
UNGMIn	Spänningens lägsta RMS under intervallet $U_{rms} (\frac{1}{2})$	4
UNGMMax	Spänningens högsta RMS under intervallet $U_{rms} (\frac{1}{2})$	4
U12Ave	Huvudspänningens RMS under hela lagringsintervallet	1-2
U12Min	Huvudspänningens lägsta RMS under intervallet $U_{rms} (\frac{1}{2})$	1-2
U12Max	Huvudspänningens högsta RMS under intervallet $U_{rms} (\frac{1}{2})$	1-2
U23Ave	Huvudspänningens RMS under hela lagringsintervallet	2-3
U23Min	Huvudspänningens lägsta RMS under intervallet $U_{rms} (\frac{1}{2})$	2-3
U23Max	Huvudspänningens högsta RMS under intervallet $U_{rms} (\frac{1}{2})$	2-3
U31Ave	Huvudspänningens RMS under hela lagringsintervallet	3-1
U31Min	Huvudspänningens lägsta RMS under intervallet $U_{rms} (\frac{1}{2})$	3-1
U31Max	Huvudspänningens högsta RMS under intervallet $U_{rms} (\frac{1}{2})$	3-1
UB	Spänningsobalansen (den negativa fasföljden i procent av den positiva fasföljden)	
UBPos	Spänningsobalans, positiv fasföljdskomponent	
UBNeg	Spänningsobalans, negativ fasföljdskomponent	
UBZero	Spänningsobalans, nollföljdskomponent	