

# Elkvalitetsaspekter av distribuerad elproduktion

FIE Kompetensdag 29 januari 2020

Natan Gothelf

HARMONIZER Power Quality Consulting AB

Banergatan 63, 115 53 Stockholm

070-783 88 89

E-mail: [natan.gothelf@harmonizer.nu](mailto:natan.gothelf@harmonizer.nu)

[www.harmonizer.nu](http://www.harmonizer.nu)

# Om Harmonizer

Harmonizer Power Quality Consulting är ett konsultbolag specialiserat på elkvalitetsfrågor. Vi hjälper våra kunder att uppnå harmoni i elnätet och därmed undvika besvärliga och kostsamma driftsstörningar.

Sedan starten 1992 har vi hjälpt hundratals kraft- och industribolag i Sverige och utomlands.

# Om Harmonizer

Våra tjänster:

- Elkvalitetsmätningar
- Nätsimuleringar med avseende på transienter, övertoner, spänningsvariationer, aktiv- och reaktiveffekt
- Dimensionering av utrustning för eliminering av övertoner, transienter, spänningsdippar, ferroresonanser, högfrekvensstörningar
- Driftsättning och verifikationsmätningar
- Utbildning

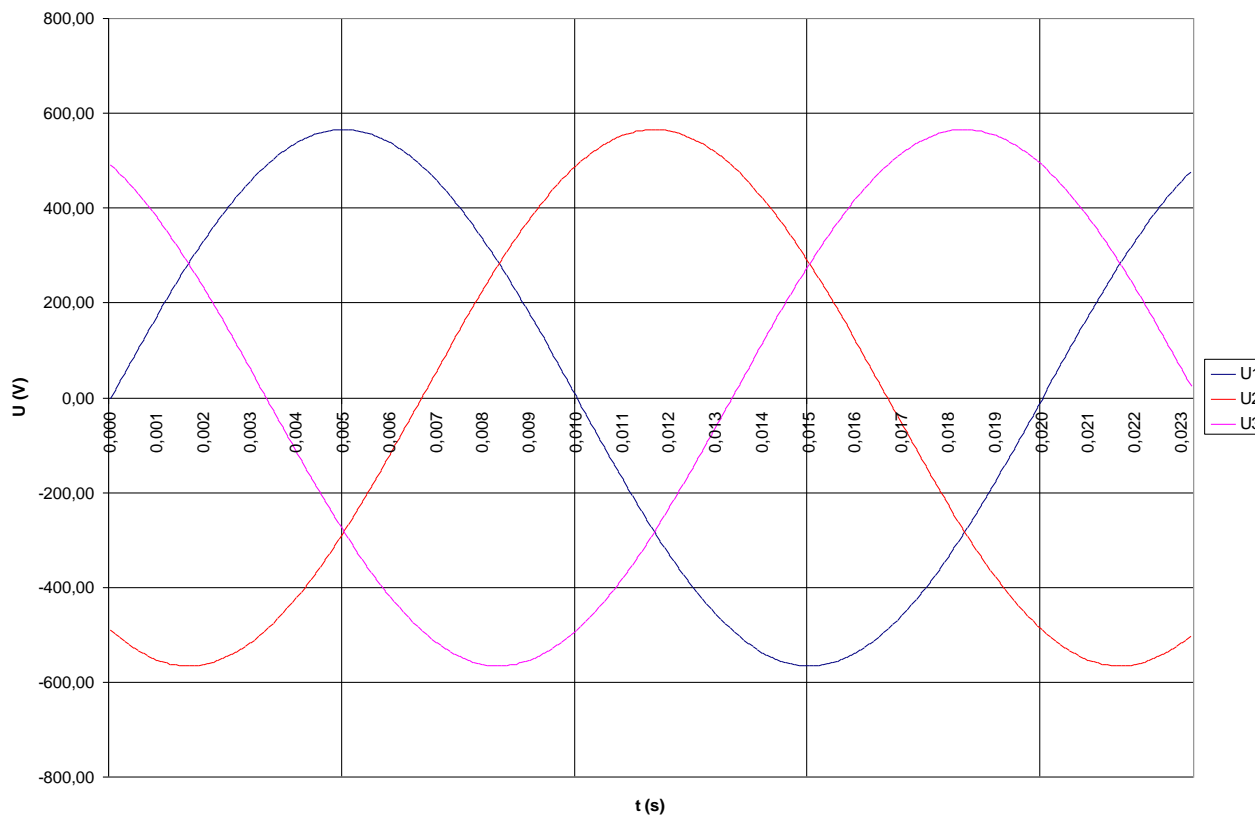
# Innehåll

- Elkvalitetsbegrepp
- Dagens och framtida elsystem
- Övertoner
- Övertonsfilter
- Ferroresonans
- Dämpfilter
- Transienter
- PQA
- Sammanfattning

# Elkvalitetsbegrepp

# Elkvalitetsbegrepp

## Idealisk spänningskurva



# Elkvalitetsbegrepp

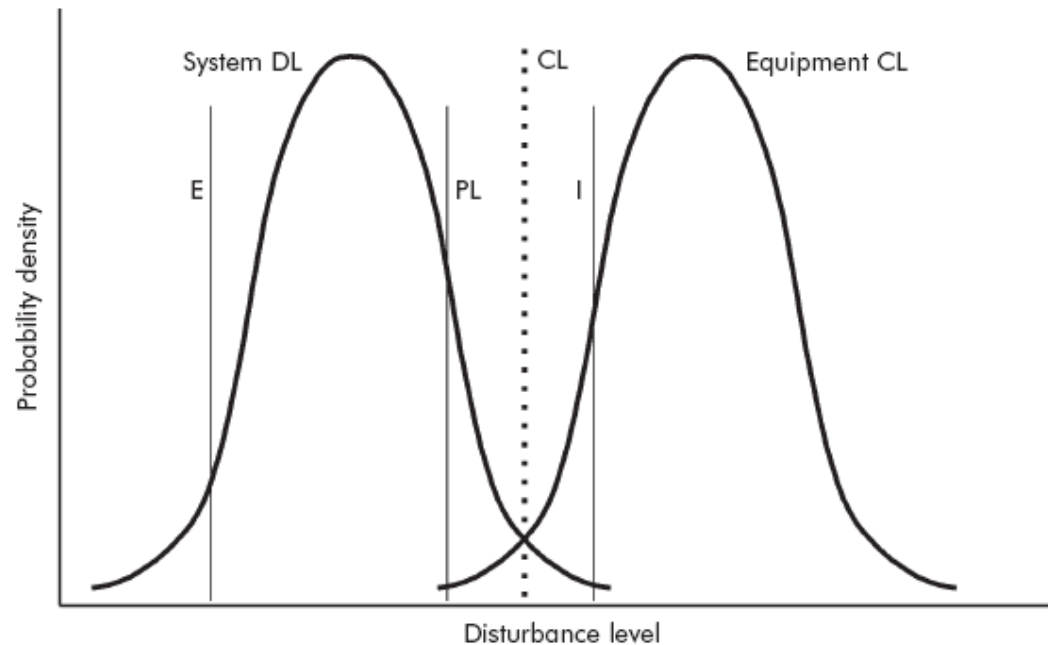
Elkvalitet är mått på avvikelserna mellan den verkliga spänningskurvan och idealiska sinuskurvan.

# Elkvalitetsparametrar

- Spänningsnivå
- Frekvens
- Övertoner
- Flimmer (Flicker)
- Kortvariga spänningssänkningar /höjningar av RMS värden(sags/swells)
- Transienter
- Osymmetri



# Emission, Immunitet och Kompatibilitetsnivå



EMC nivåer för alla parametrar är definierade i Elkvalitets normer som t.ex. EN 50 160, IEEE std 18 etc.

# Konsekvenser av dåligt elkvalitet

- Avbrott
- Driftstörningar
- Produktionsstopp
- Utrustningshaverier

# Elsystem uppbyggnad

- Generering
- Transmission
- Distribution
- Förbrukning

# Dagens och framtida elsystem

# Dagens elsystem

Elkraften produceras huvudsakligen av stora roterande generatorer i vatten- och kärnkraftverk vilket ger följande fördelar:

- Hög kortslutningseffekt
- Mycket bra frekvensstabilitet
- Bra förmåga att absorbera övertoner och transienter och därmed minska deras återverkan på nätet
- Bra förmåga att dämpa svängningar vid kortslutningar och lastbortfall

Resultat: Stabil och tillförlitlig drift

# Framtida elsystem

En stor del av elkraften produceras av många små och medelstora energikällor ofta anslutna till nätet via frekvensomriktare. Karakteriseras av:

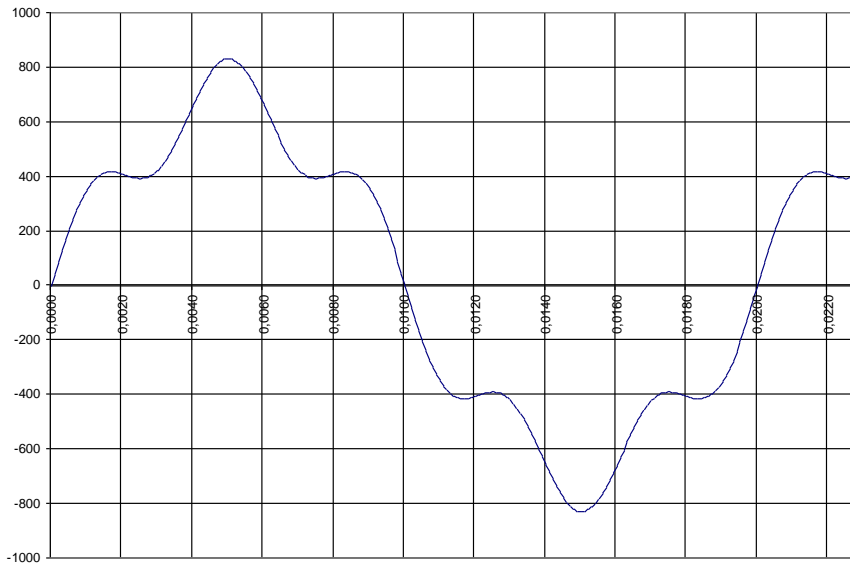
- Sämre frekvensstabilitet
- Genererar störningar
- Har sämre immunitet mot störningar
- Utgör hög impedans för övertoner och transienter
- Långa kabelförbindelser bidrar med kapacitanser som skapar övertonsresonanser, ferroresonanser och orsakar höga , högfrekventa kopplingstransienter

Konsekvenserna blir:

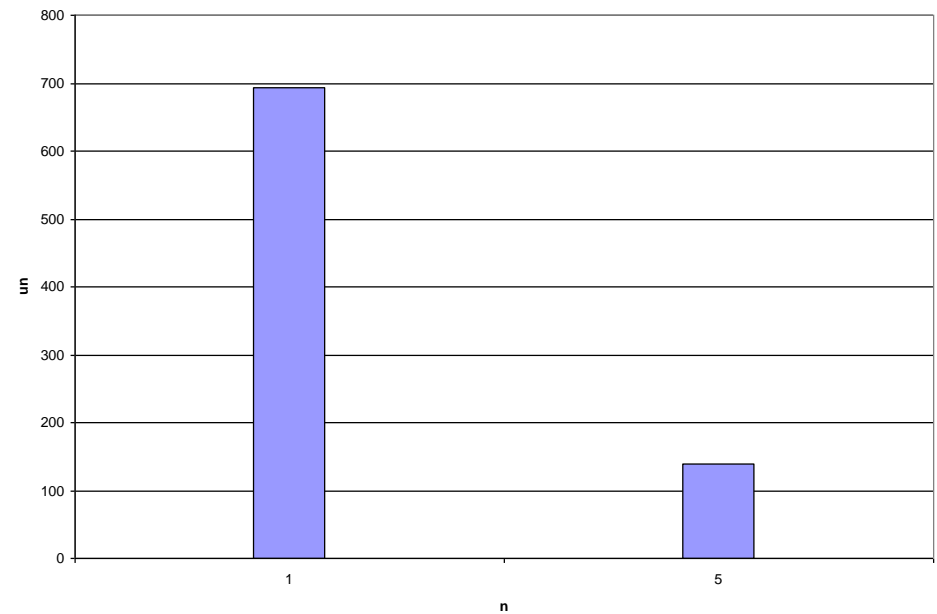
- Större frekvens- och spänningsvariationer
- Högre övertonsdistorsion
- Transienter med högre amplitud och längre varaktighet
- Vagabonderade strömmar i nätet
- Större risk för övertonsresonanser och ferroresonanser
- Större risk för driftstörningar och utrustningshaverier

# Övertoner

# Övertoner



Tidsdomän



Frekvensdomän



# Fourier teori

Vid analyser av icke sinusformade funktioner tillämpar man Fourier teorin som lyder:

*Varje periodisk- och kontinuerlig funktion kan presenteras som en serie av sinusformade termer enligt följande:*

$$F(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + A_k \sin(k\omega t + \varphi_k) + \dots = A_0 + \sum A_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

*Där  $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$*

# Övertoner

Sinusformade komponenter av en Fourierserie med frekvenser som är heltalsmultiplar av grundtonsfrekvensen (nätfrekvensen)

# Övertonskällor

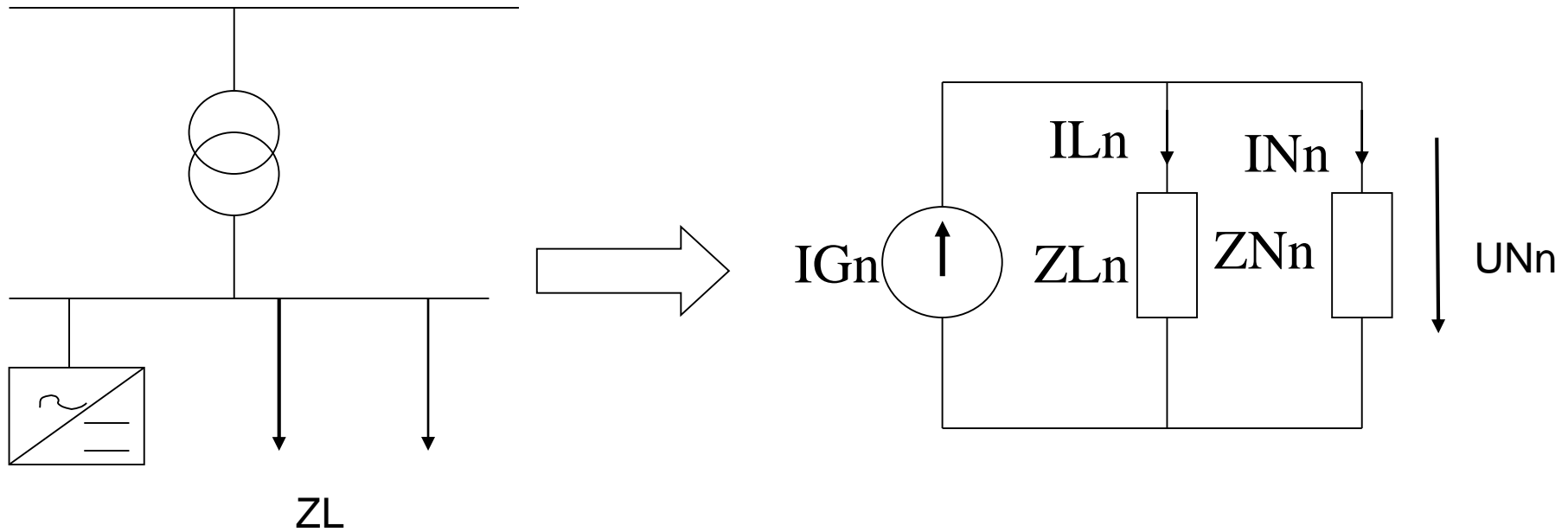
De vanligaste övertonskällor i elektriska nät är:

- AC/DC omvandlare (likriktare)
- AC/AC (frekvens) omvandlare
- IT utrustning och hemelektronik
- Belysning
- *Ljusbågsugnar*
- *Svetsaggregat*

# Utvecklingstrender

- Moderna laster har effektfaktor nära 1.0 eller är t.o.m. capacitiva vilket innebär att det finns litet behov av reaktiveffektkompensering
- Användning av övertonsgenererande utrustning inom industri, kontor och bostäder ökar stadigt
- Sol- och vindkraft bidrar med övertonsgenerering
- Övertonsspektrum som genereras av dessa apparater flyttas till högre frekvensområden
- Elektriska laster och styrutrustningar är mera känsliga för störningar

# Spridning av övertoner



$$I_{Ln} = I_{Gn} * \frac{Z_{Nn}}{Z_{Ln} + Z_{Nn}}$$

$$I_{Nn} = I_{Gn} * \frac{Z_{Ln}}{Z_{Ln} + Z_{Nn}}$$

$$U_{Nn} = I_{Nn} * Z_{Nn}$$

$$U_{Nn} = I_{Gn} * \frac{1}{\frac{1}{Z_{Nn}} + \frac{1}{Z_{Ln}}}$$

# Diskussion

Låg nätimpedans resulterar generellt i:

- Låg spänningsdistorsion
- Låg övertonsbelastning av parallella laster

Hög nätimpedans resulterar generellt i:

- Högre spänningsdistorsion
- Högre övertonsbelastning av parallella laster

# Slutsatser

För att uppnå Elektromagnetisk kompatibilitet med avseende på övertoner behöver man begränsa emissionen och förbättra filtrering av övertoner.

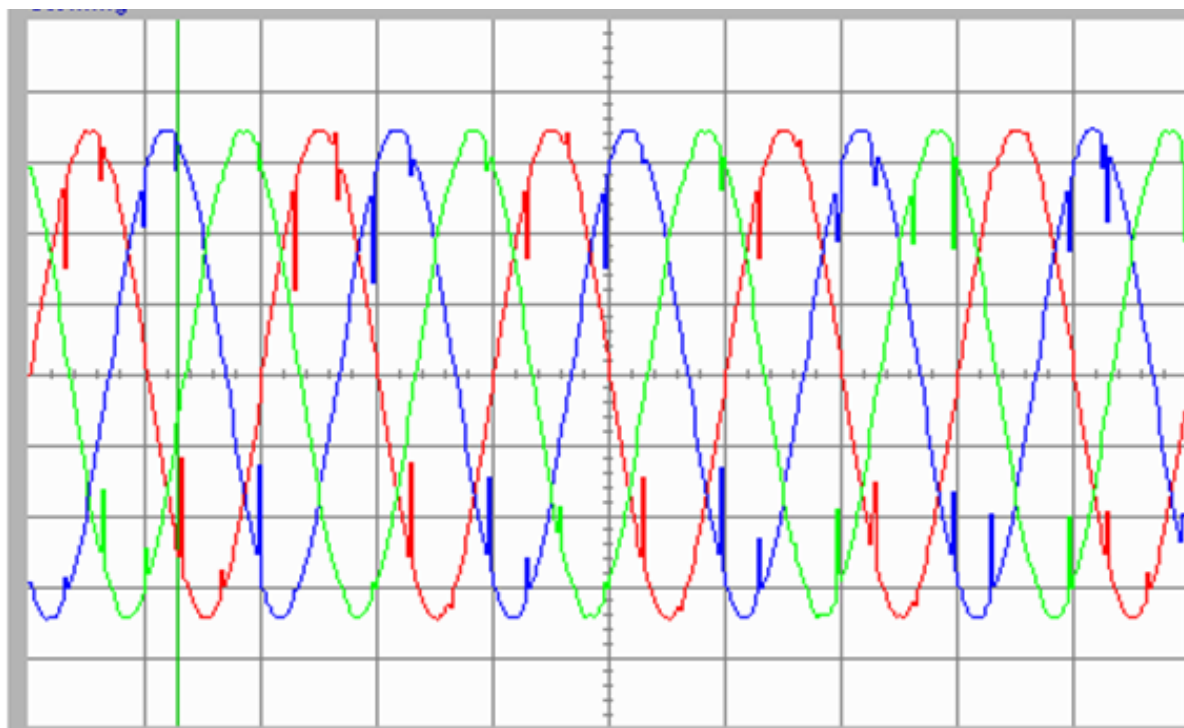
Lämpliga åtgärder kan vara:

- Spärrfilter i serie med större strömriktare eller grupper av strömriktare
- Bredbandsfilter
- Aktiva filter

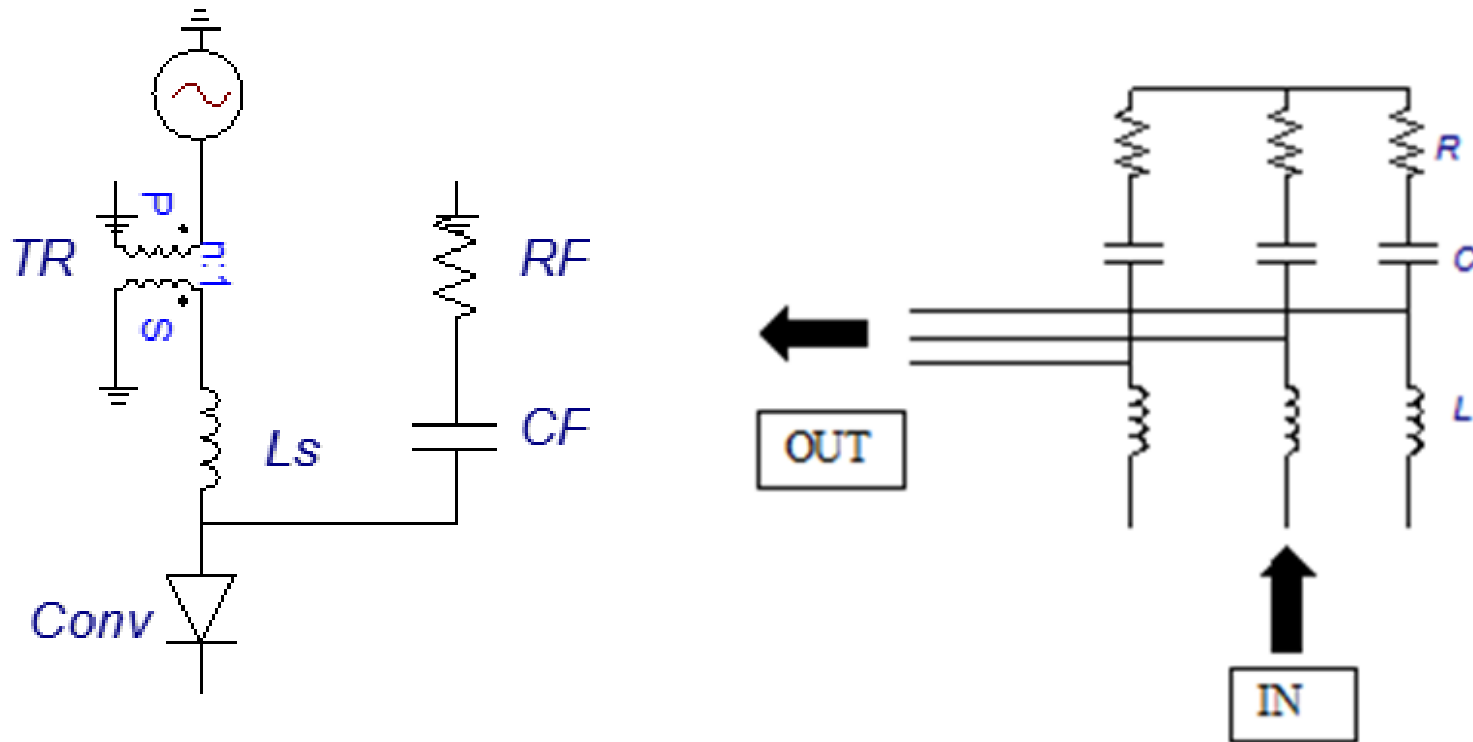
# Störningar från strömriktare



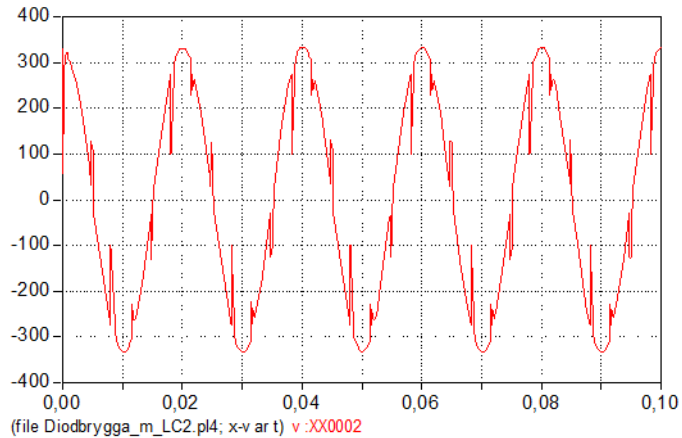
# Spänningskurva utan filter



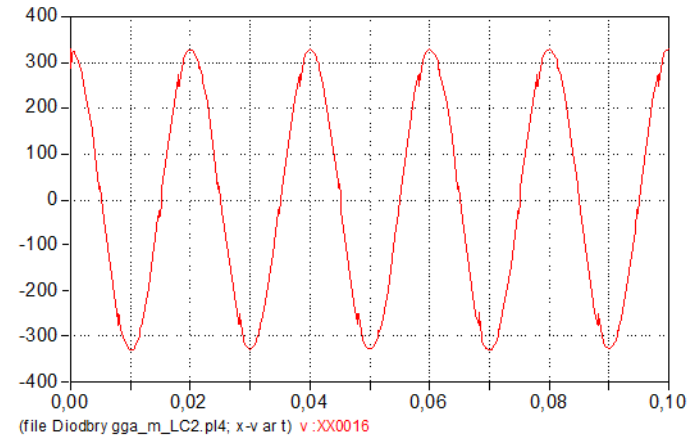
# Strömrichtarfilter



# Simuleringsresultat med strömriktarfilter



Spänningskurva på strömriktarsidan av filtret



Spänningskurva på nätsidan av filtret

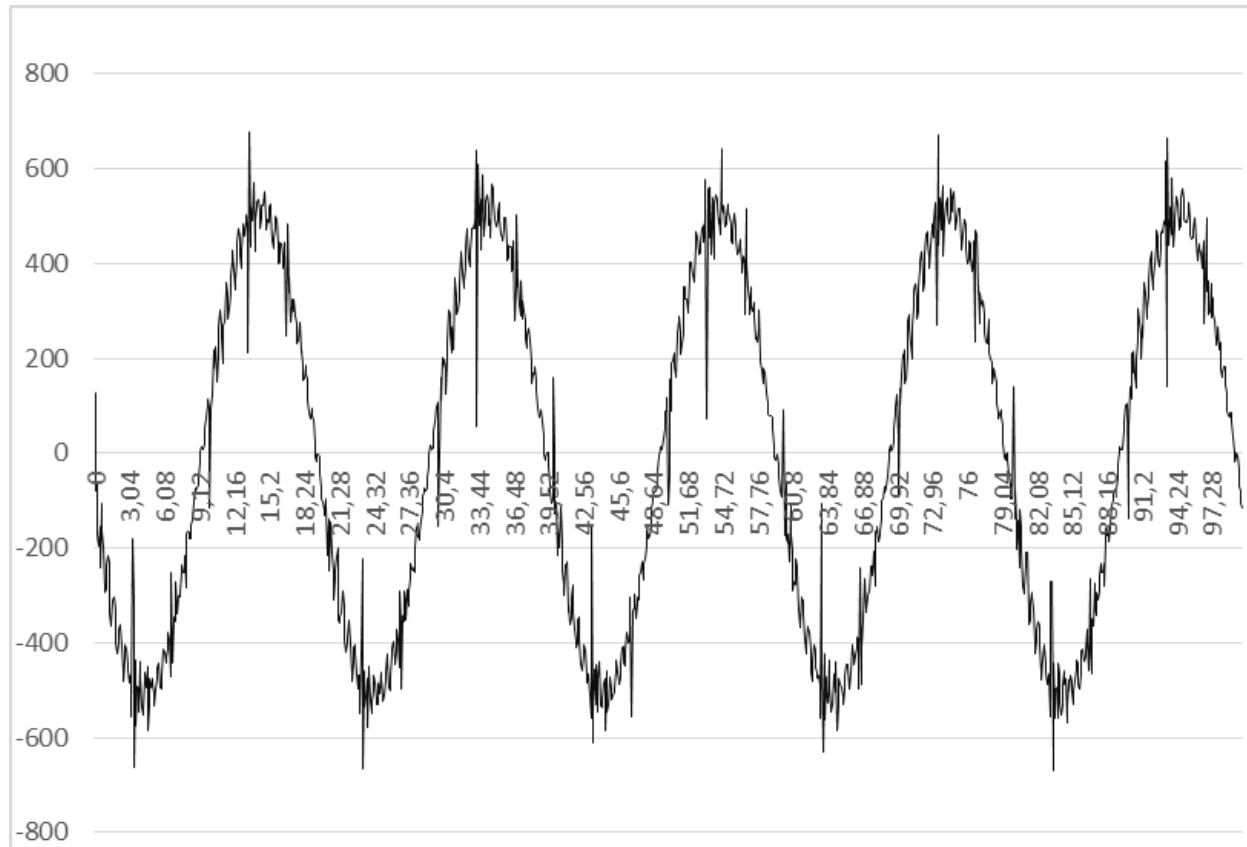
# Fördelar med strömriktarfilter

- Elimineras kommuteringsdippar
- Minskar övertonsemissionen
- Skyddar strömriktaren från störningar som inträffar på nätet

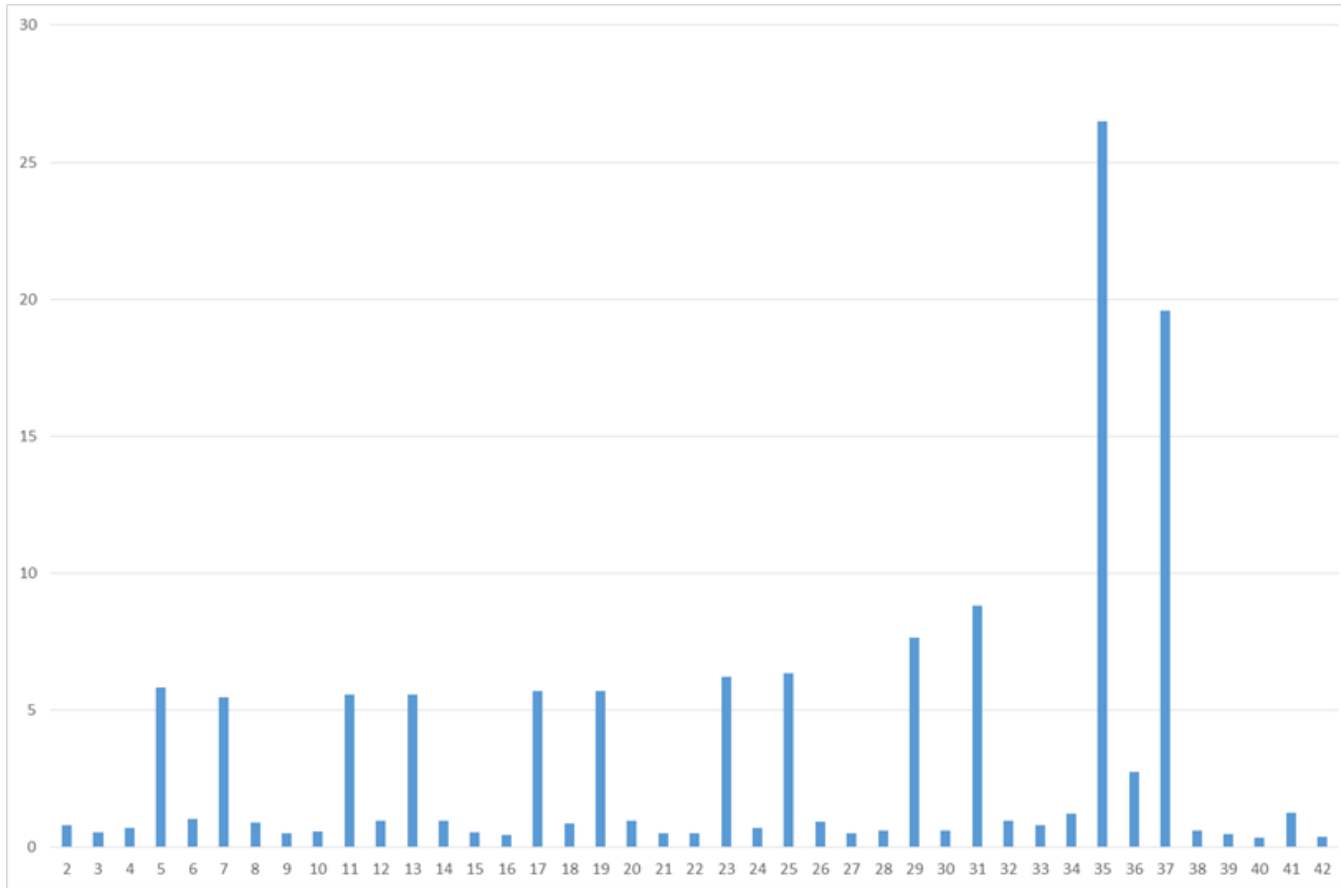
# Övertonsresonanser

## Exempel 1

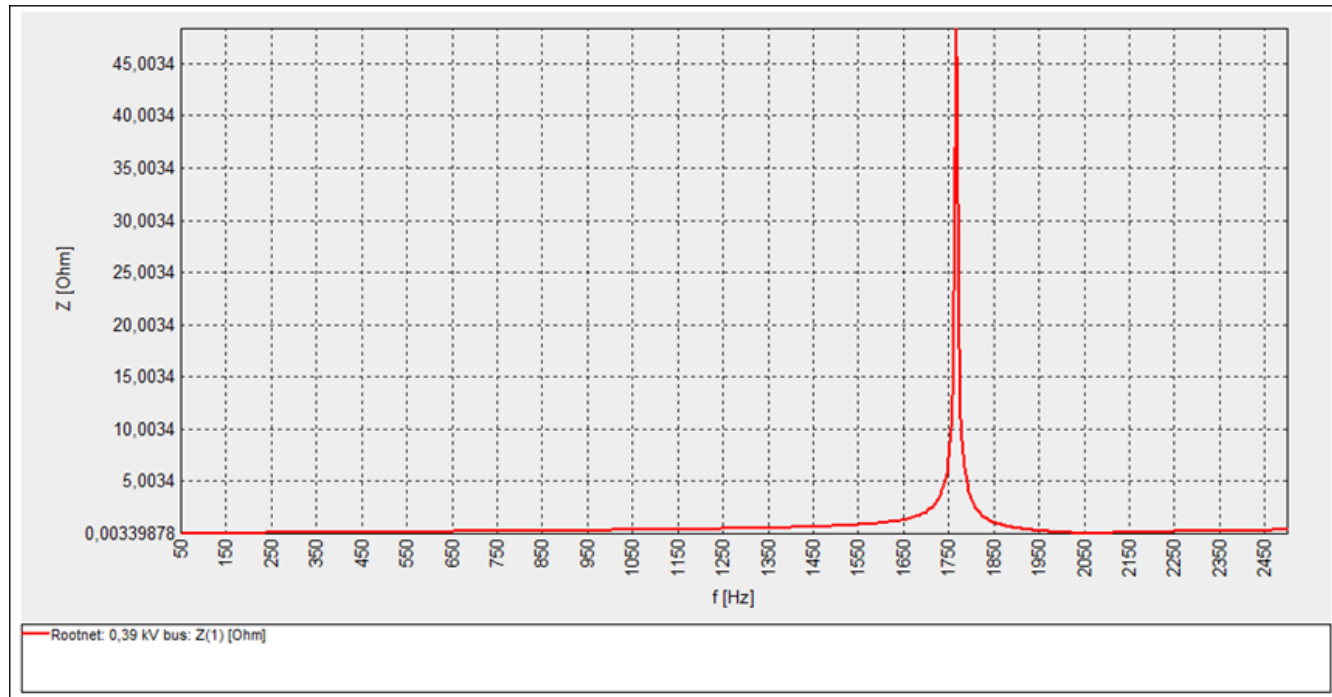
# Störningar orsakade av strömriktare



# Spänningspektrum

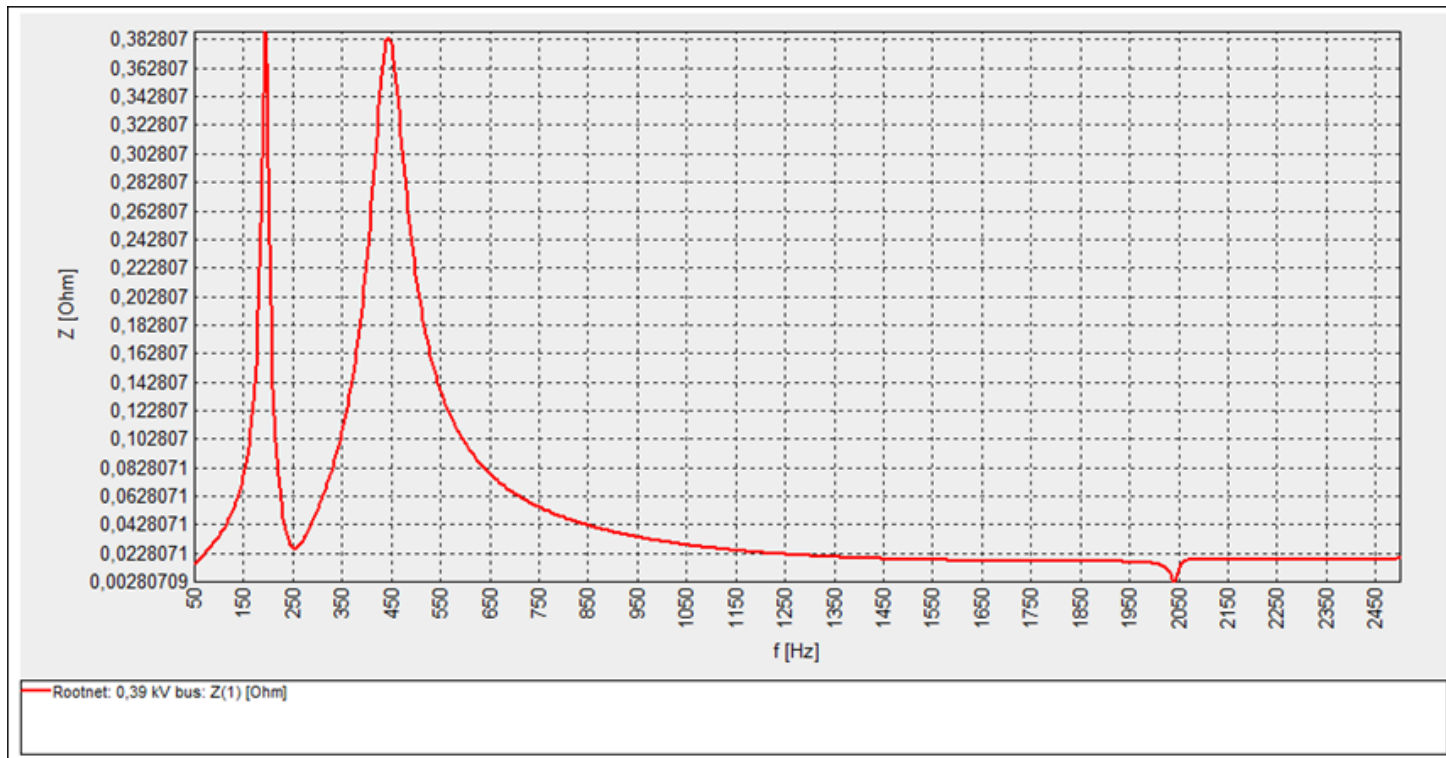


# Nätimpedans

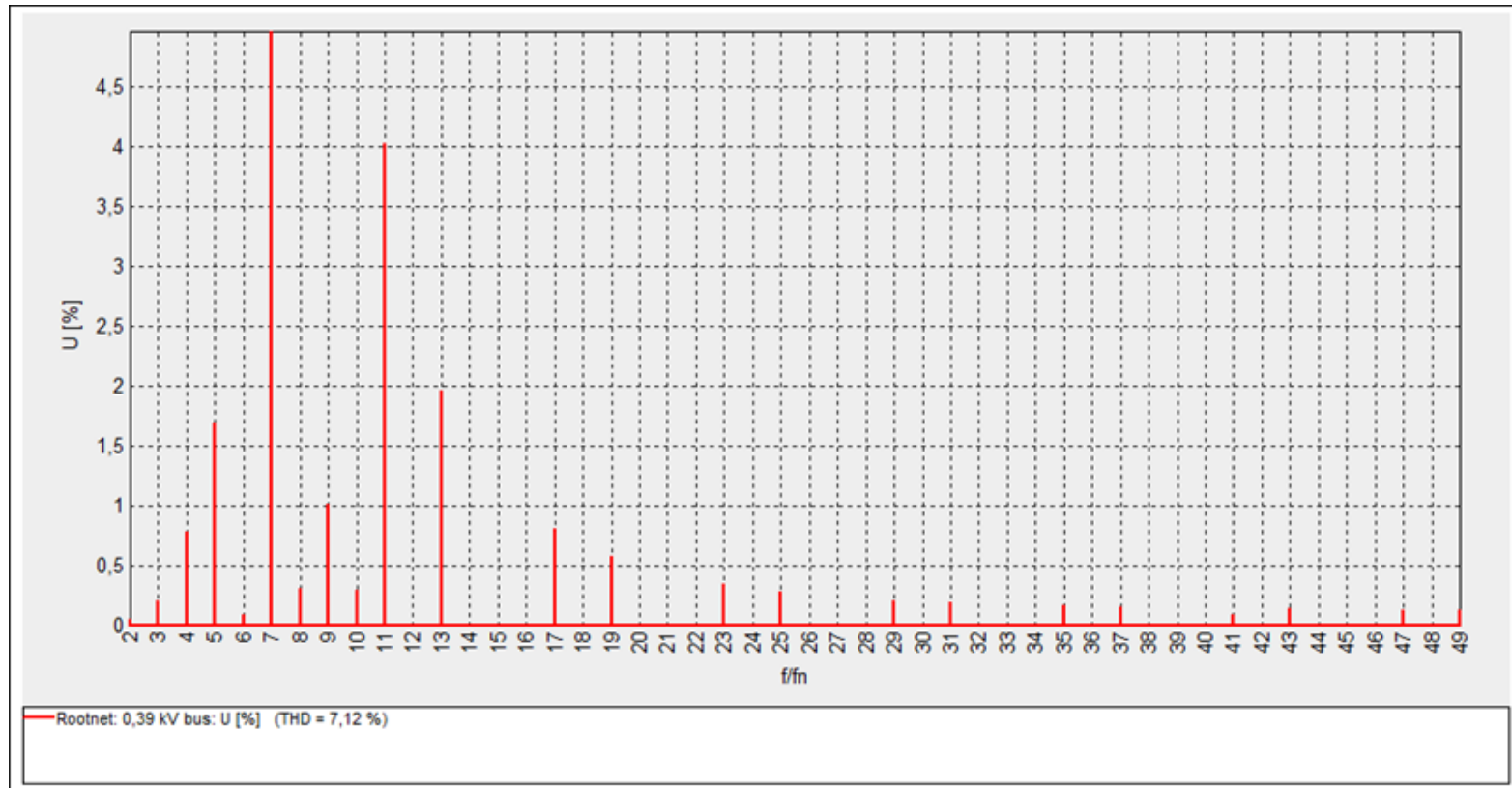




# Nätimpedans med filter



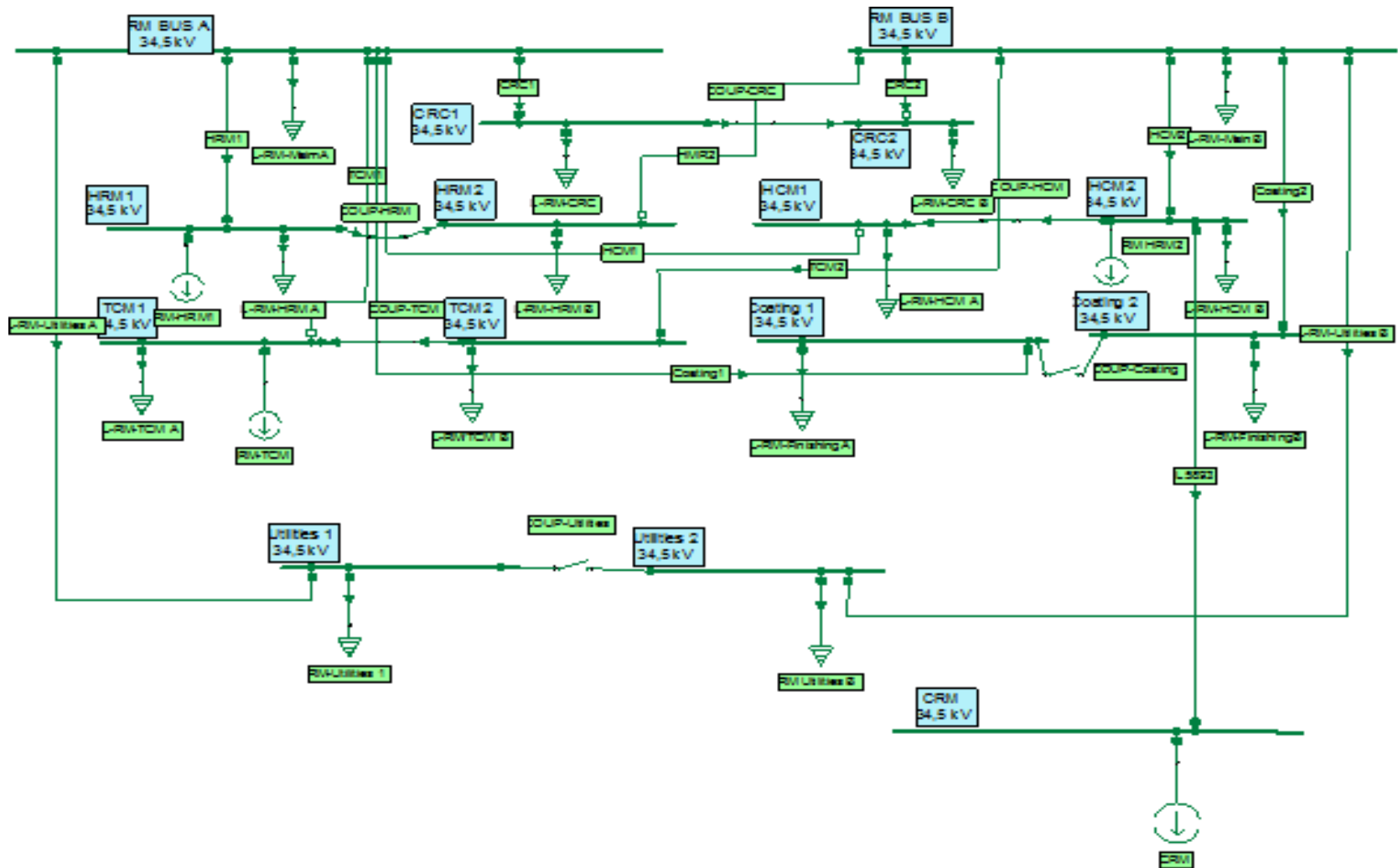
# Spänningsdistorsion med filter



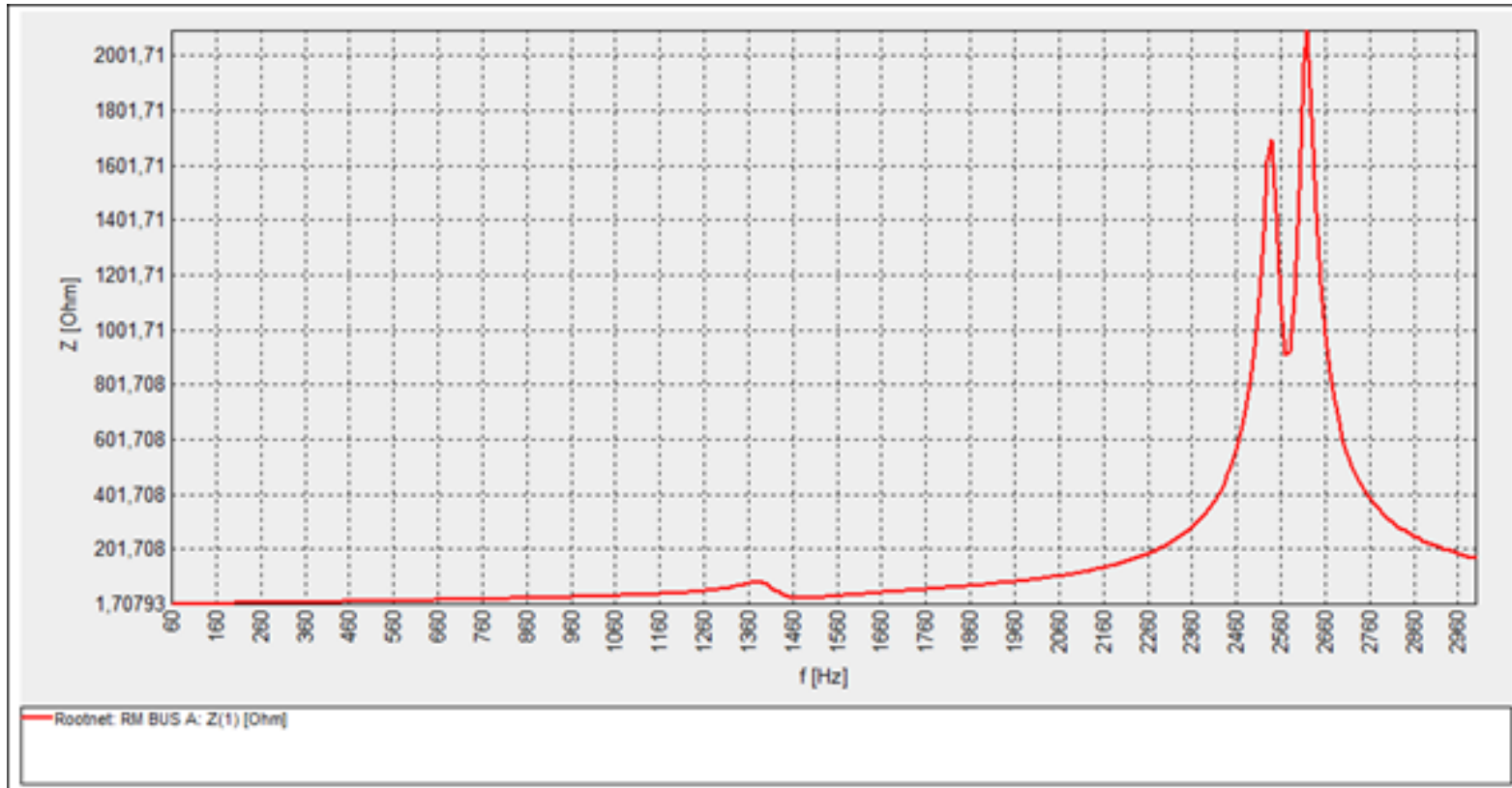
# Övertonsresonanser

## Exempel 2

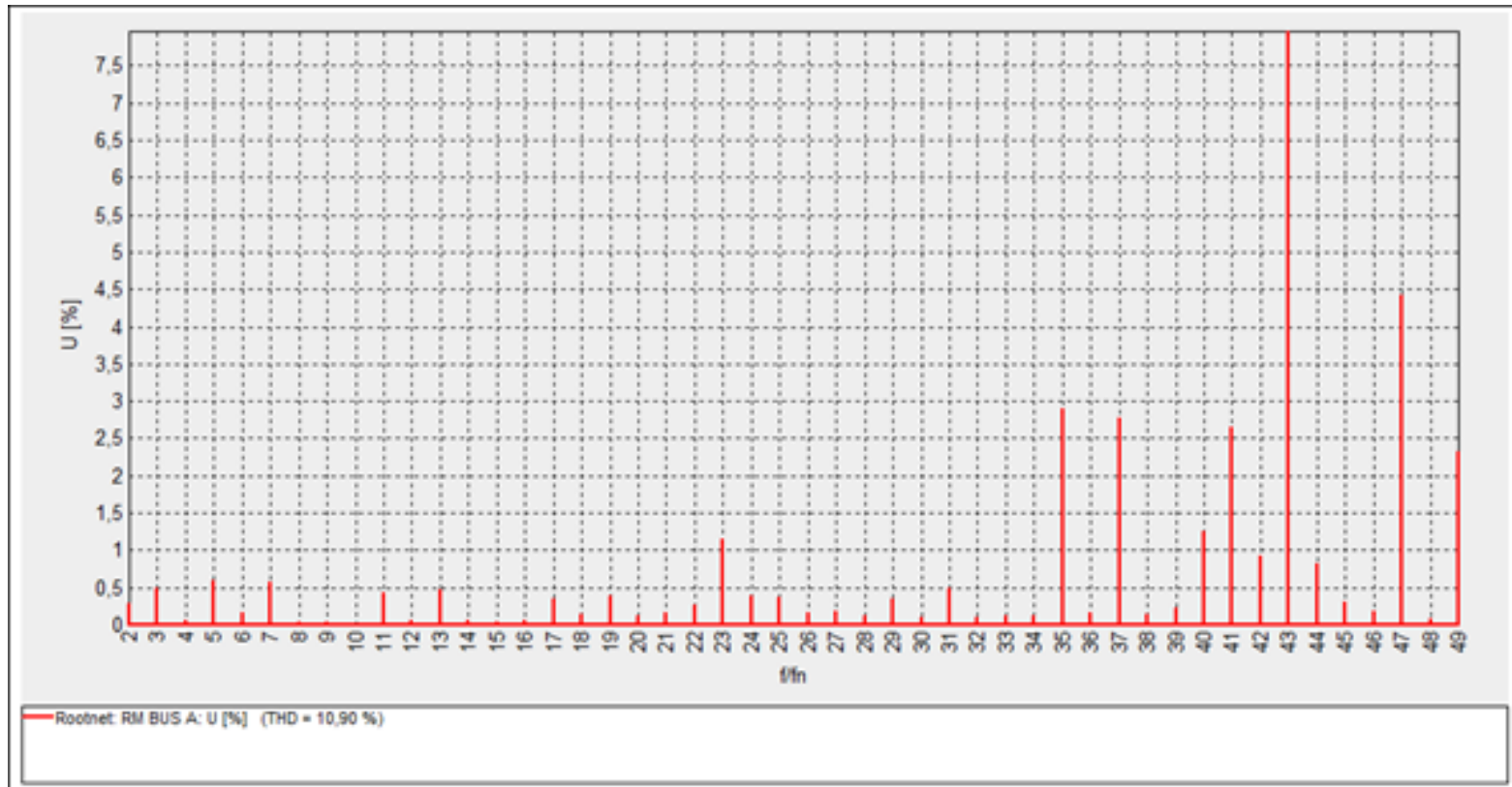
# Enlinjechema



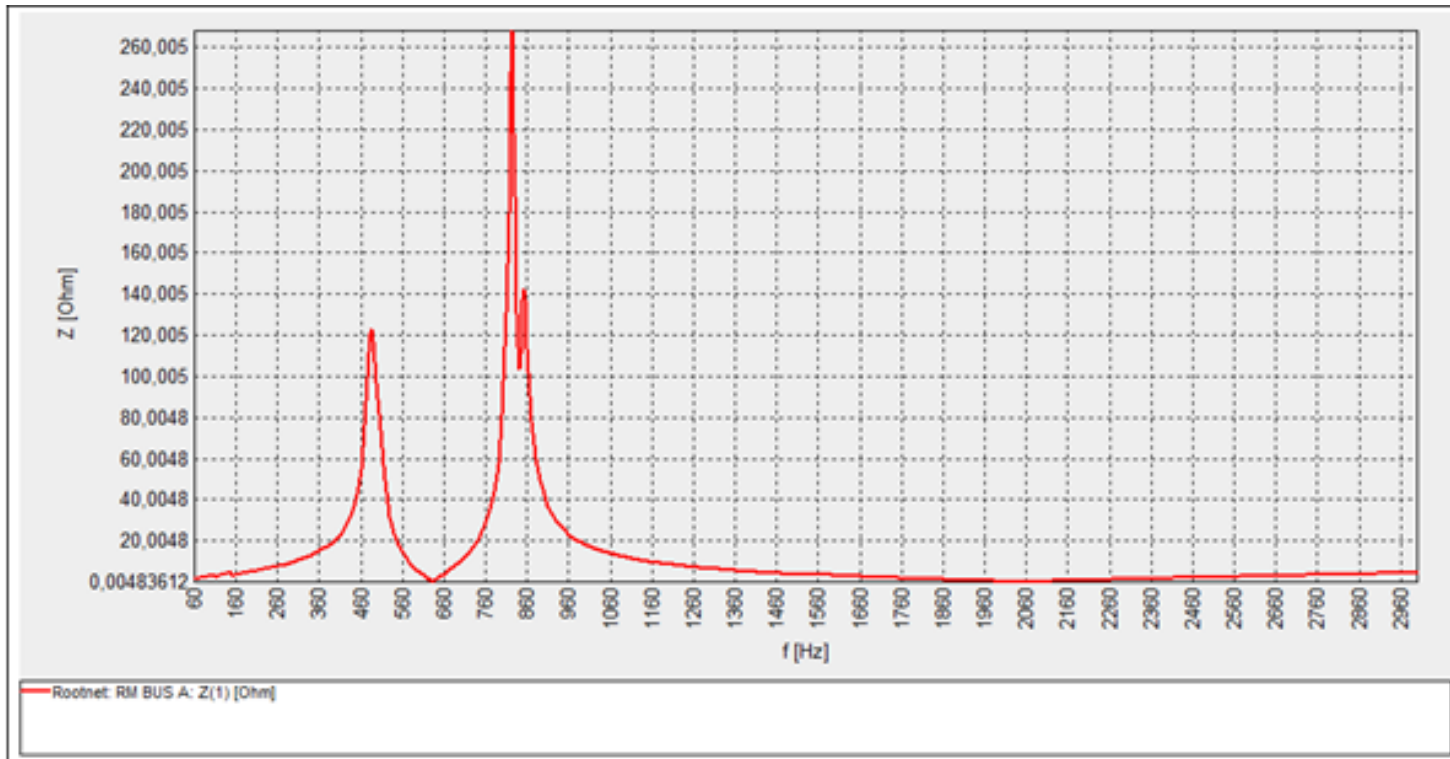
# Nätimpedans



# Spänningsdistorsion

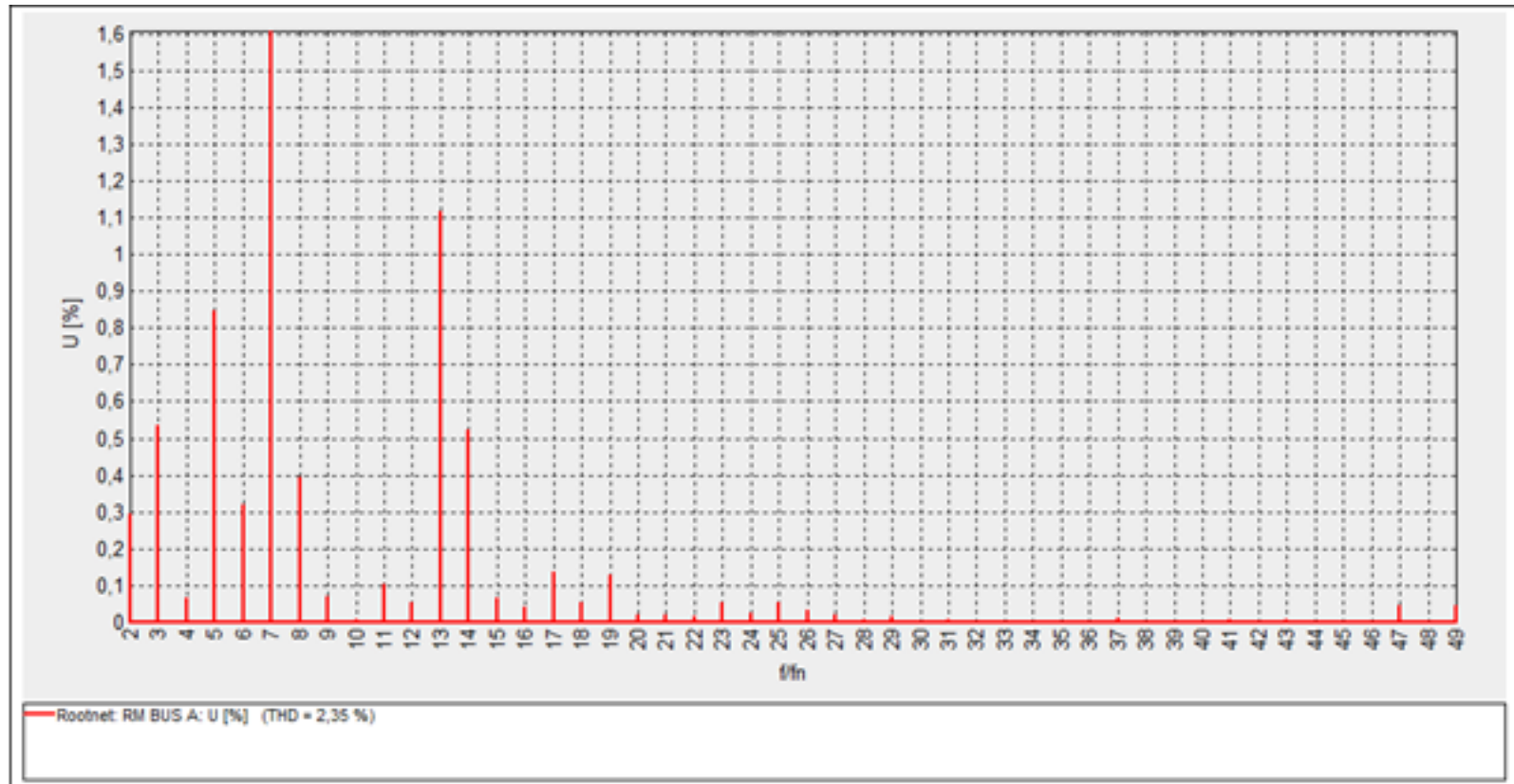


# Nätimpedans med filter





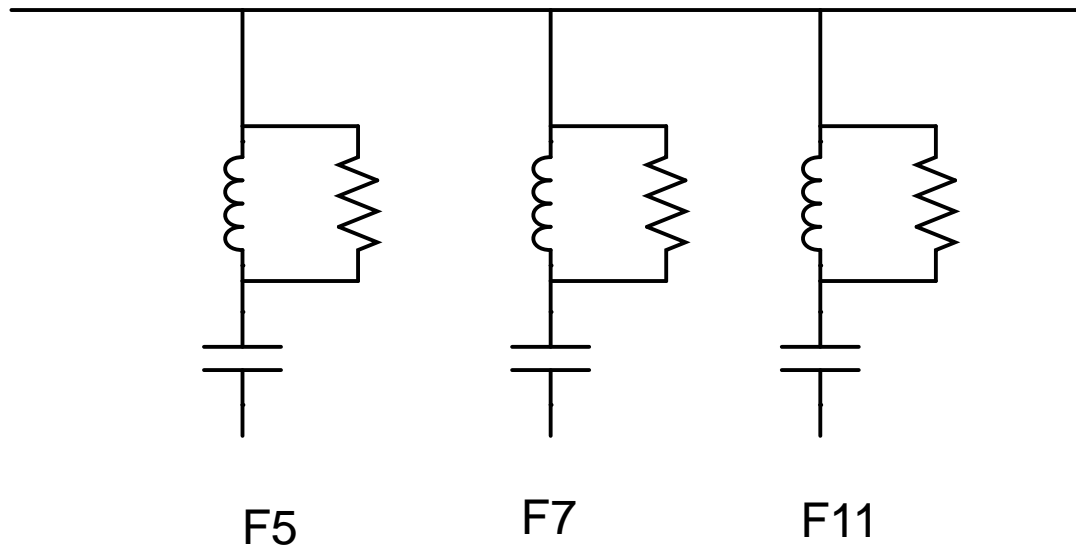
# Spänningsdistorsion med filter



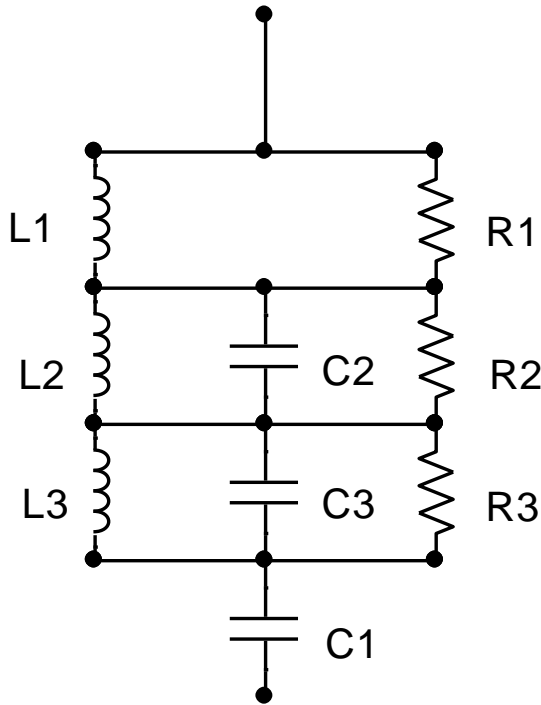


# Filterlösningar

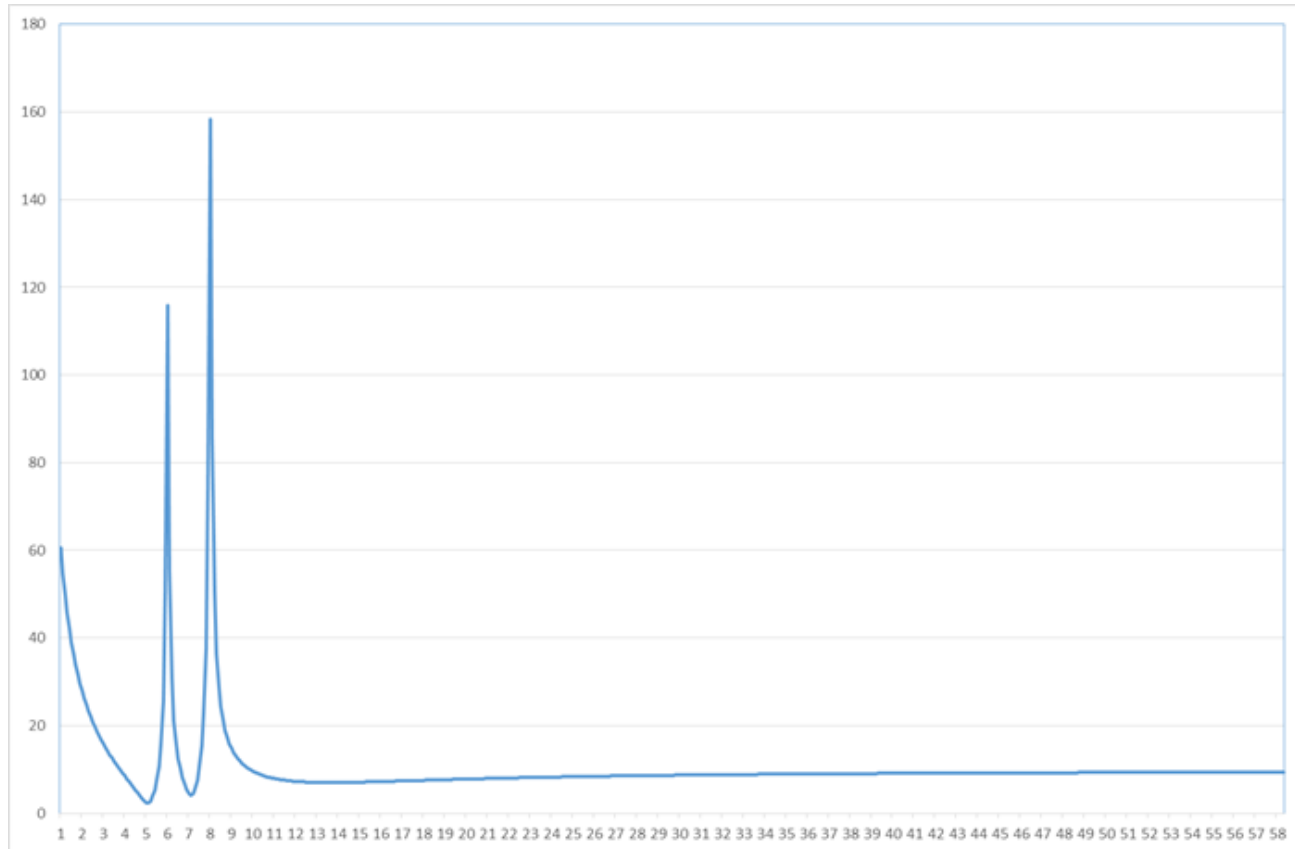
# Konventionell konfiguration



# Trippelavstämt filter



# Filterkarakteristik



# Fördelar med trippelavstämda filter

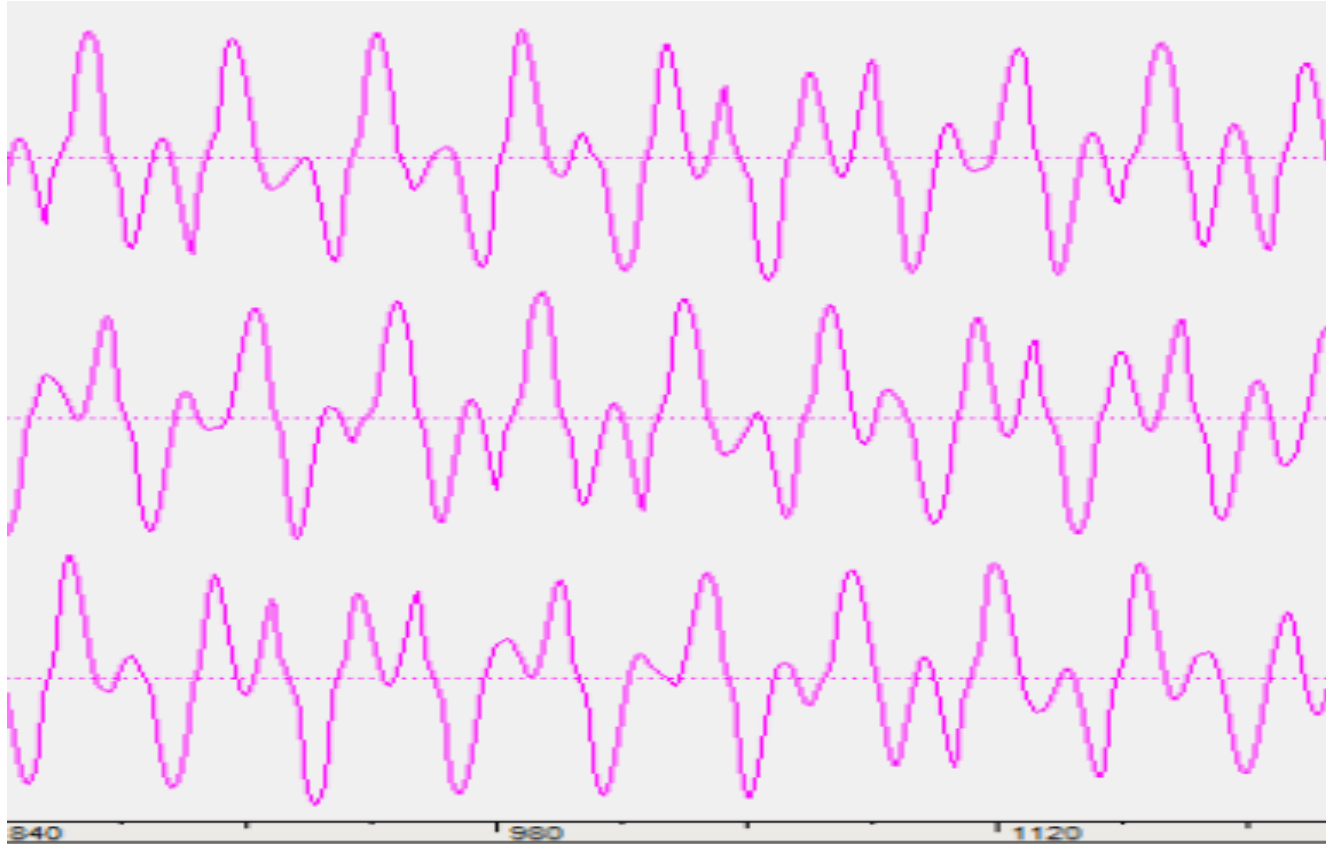
- Låg reaktiveffektgenerering
- Stor flexibilitet att forma önskad filterkaraktäristik
- Kostnadseffektiva
- Kompakt konstruktion
- Konceptet kan användas för att omvandla befintliga kondensatorbatterier och filter till effektiva trippelavstämda filter

# Ferroresonans

# Ferroresoanser i svaga nät

En av riskerna med distribuerad generering är stora variationer av kortslutningseffekten i nätet. För att uppnå stabil och störningsfri drift krävs det en hög kortslutningseffekt. När en del av kraftgeneratorer är bortkopplade minskar kortslutningseffekten vilket ökar risken för störningar. Exempel på sådana störningar är ferroresonans.

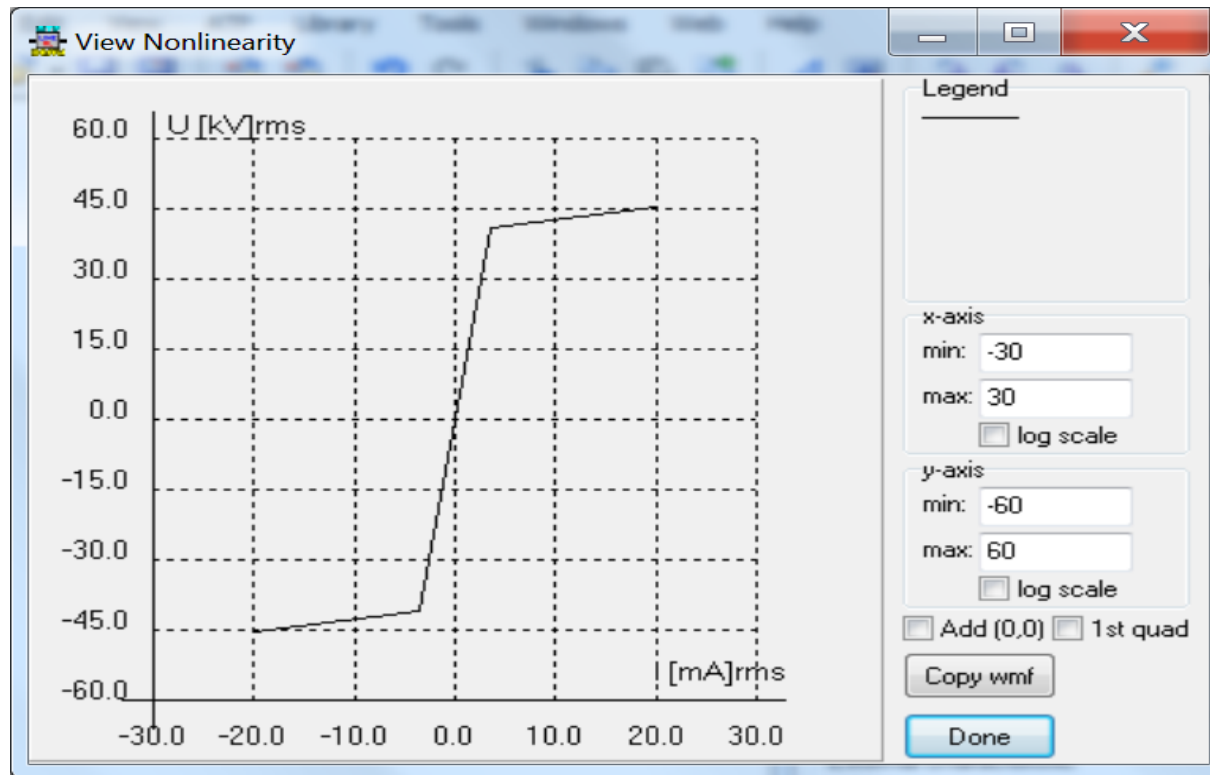
Exempel av störningar som uppstår vid lastfrånkoppling vid låg kortslutningseffekt



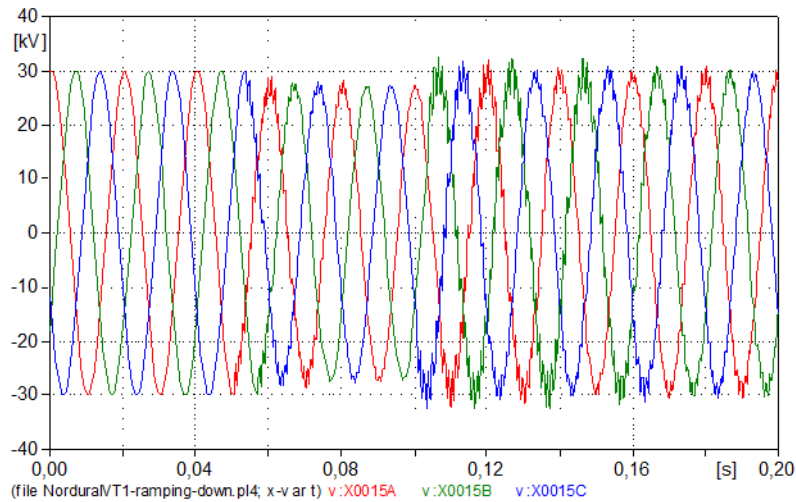




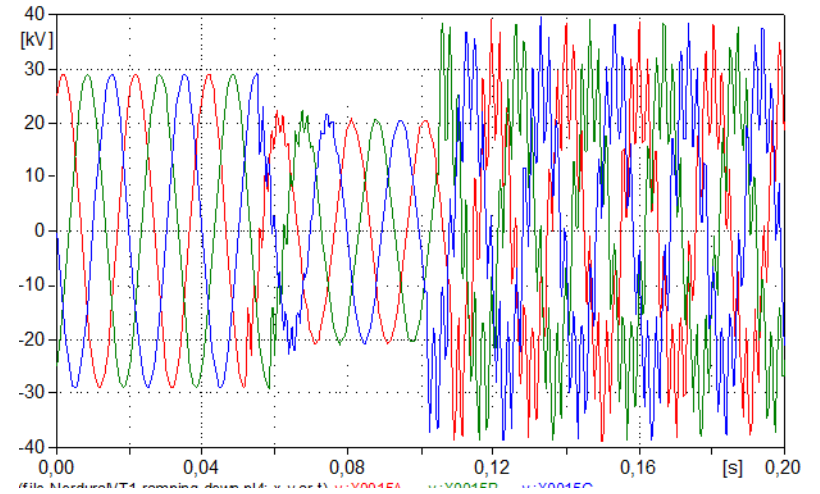
# Spänningstransformatormodell



# Simuleringsresultat

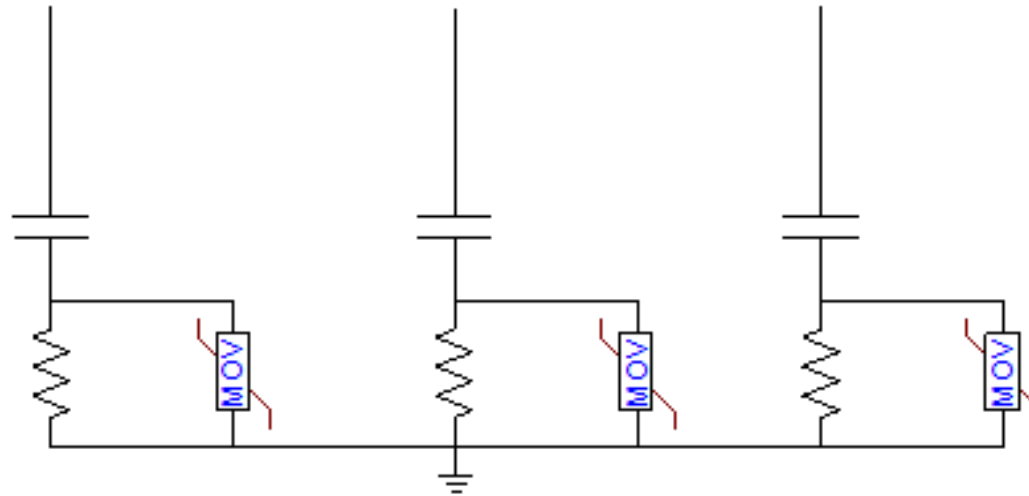


Hög kortslutningseffekt

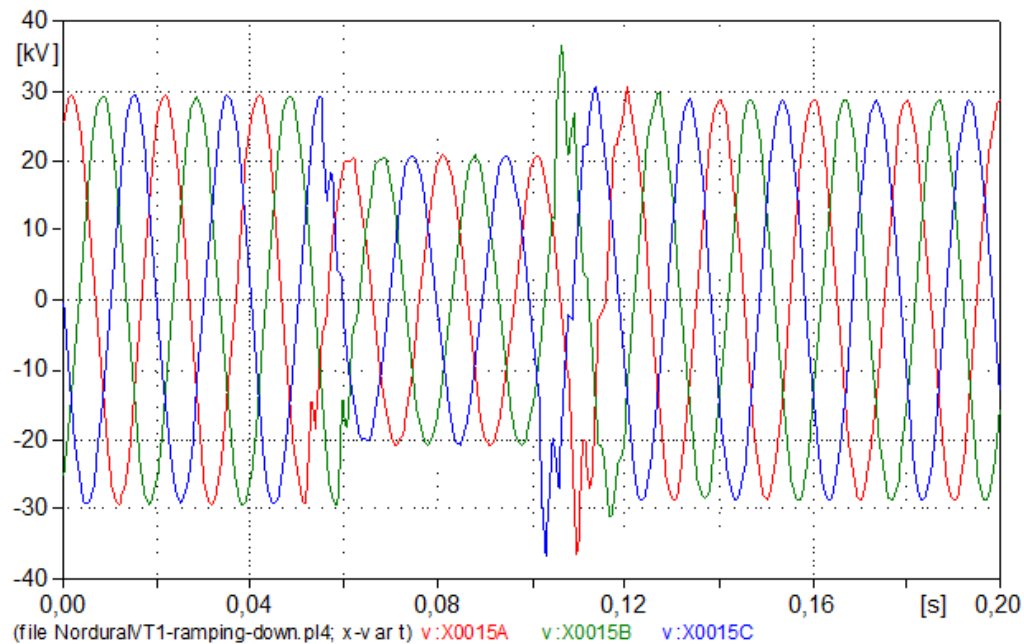


Låg kortslutningseffekt

# Dämpffilter

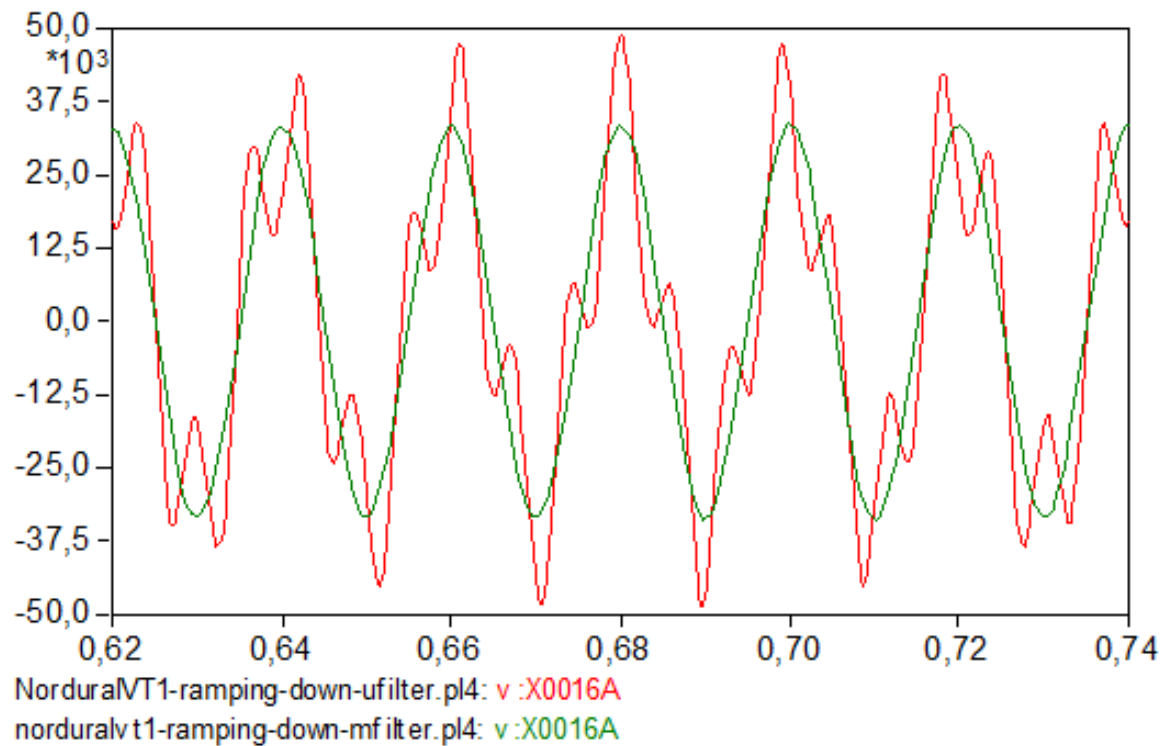


# Simuleringsresultat med dämpfilter



Låg kortslutningseffekt

# Simuleringsresultat, jämförelse



Grönkurva: med dämpkrets

Röd kurva: utan dämpkrets

RC filter dämpar effektivt spänningsoscillationer i nätet och minimerar därmed risken för transformator- och spänningstransformatorfel.

Filtret är optimerat med avseende på resistorförluster samt utrymmesbehov vilket gör att det utgör en kostnadseffektiv lösning för anläggningar med stora lastvariationer och varierande kortslutningseffekt.

# Transienter



# Transienter

Kortvariga högfrekventa överspänningar med hög amplitud. Vanligaste orsakerna:

- Åska
- Inkoppling av kondensatorbatterier
- Inkoppling av kablar
- Omkopplingar i nätet

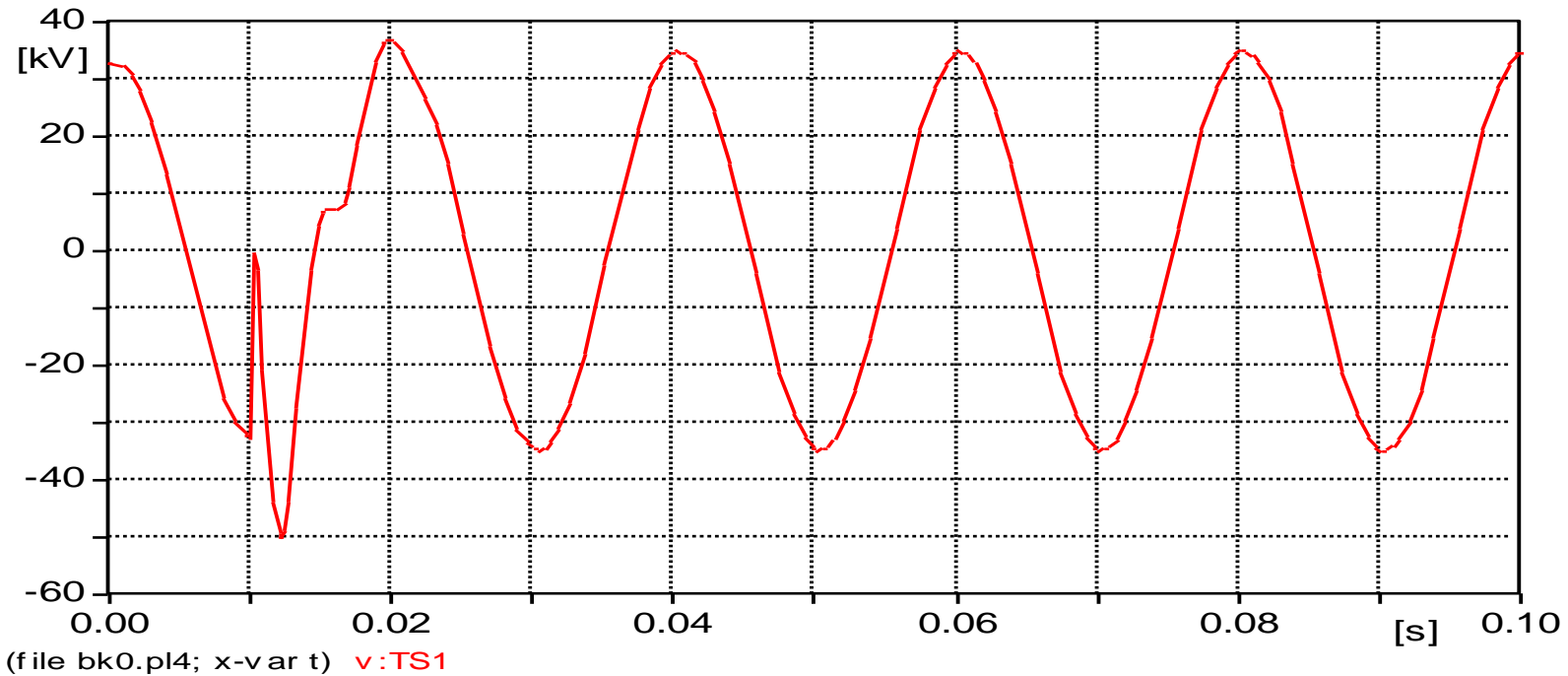
# Transienter, karakteristiska parametrar

- Amplitud
- Svängningsfrekvens
- Varaktighet

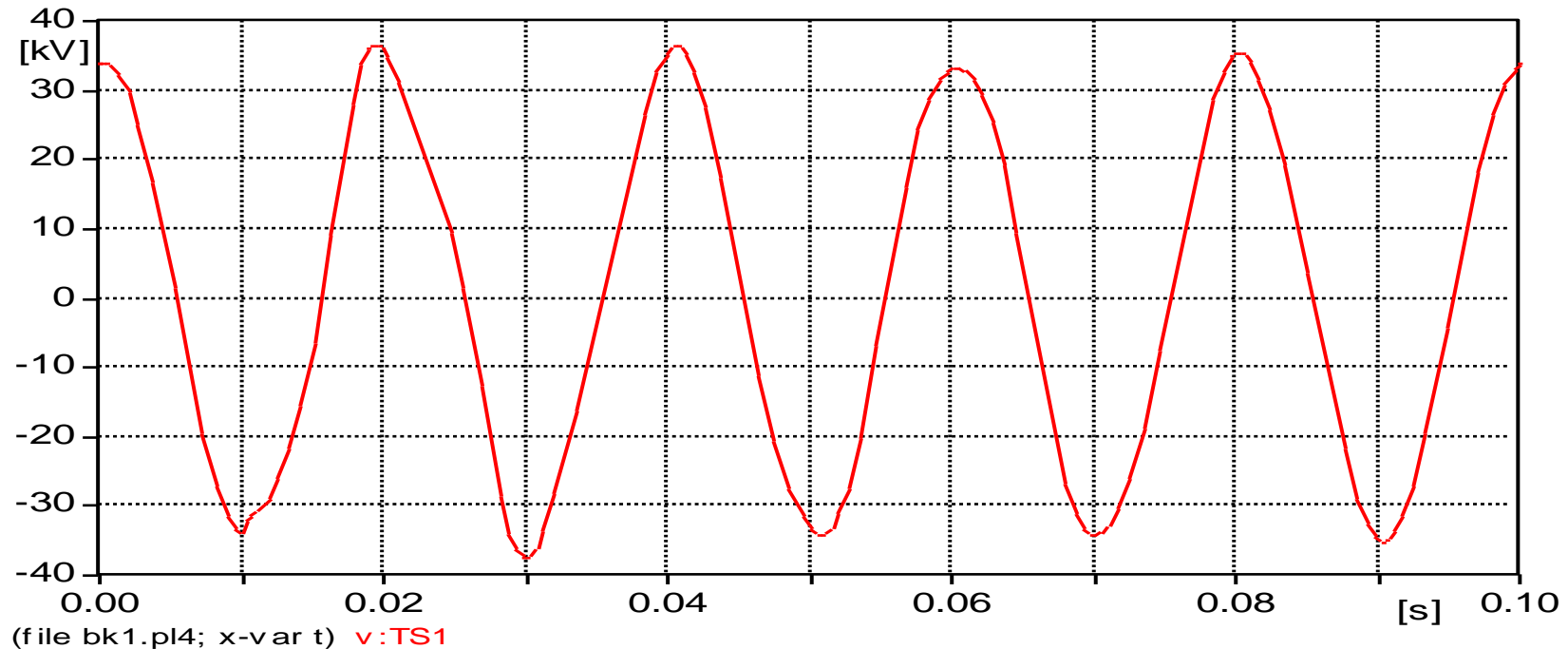
# Exempel 1

## Inkoppling av ett kondensatorbatteri

# Inkopplingstransienter utan dämpkrets



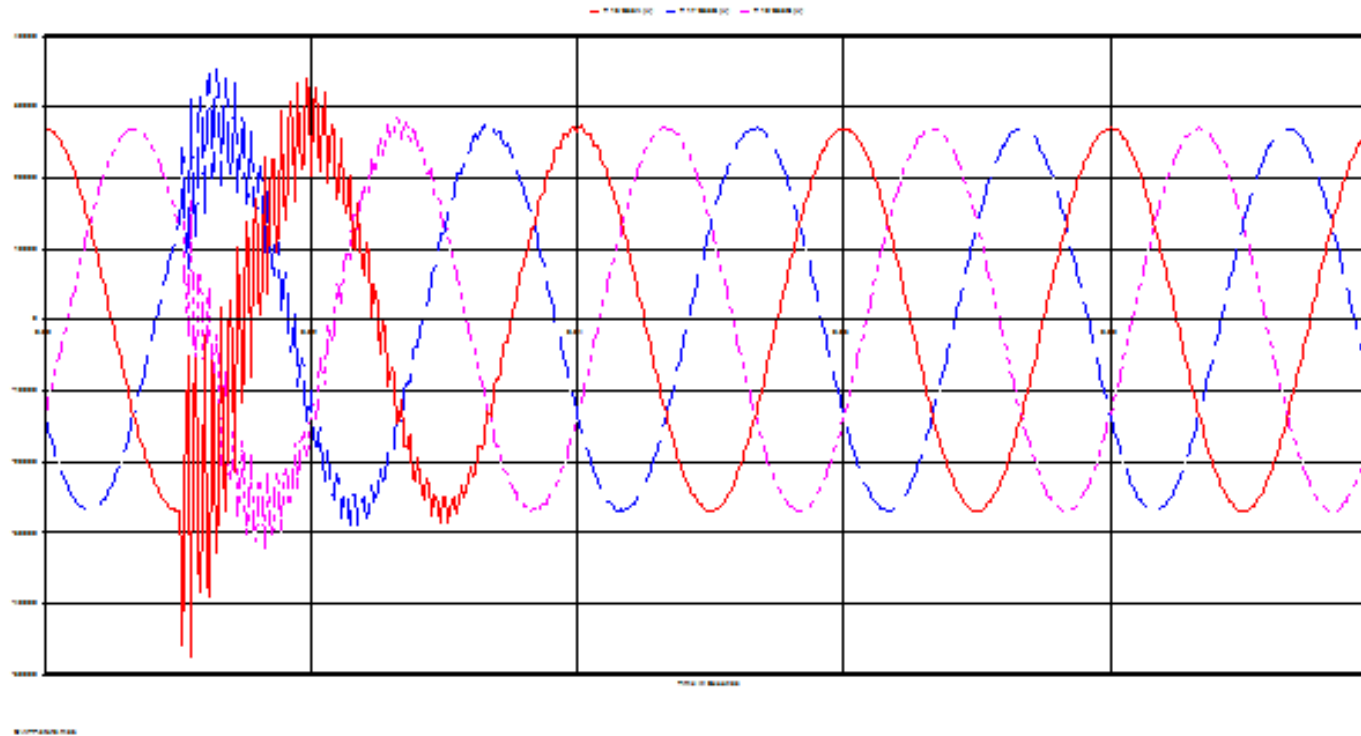
# Inkopplingstransienter med dämpkrets



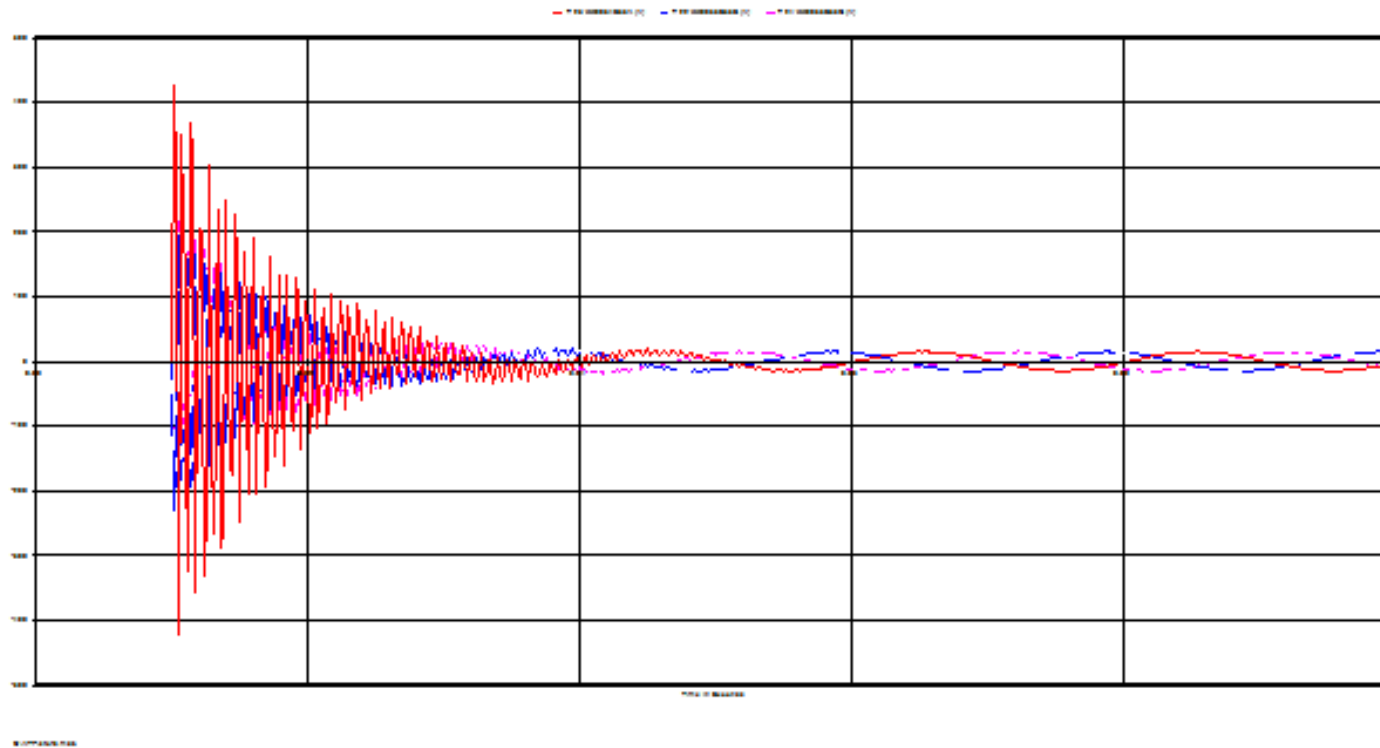
# Exempel 2

## Inkoppling av kablar

# Spänningstransient utan dämpkrets



# Strömtransient utan dämpkrets



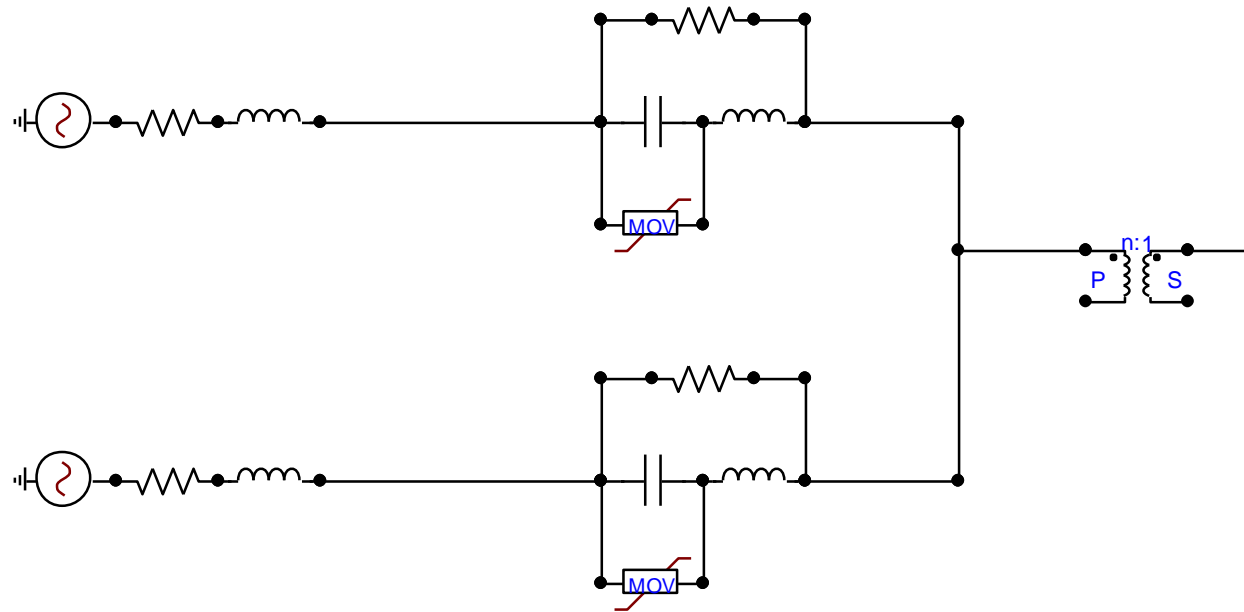


# Power Quality Adapter (PQA)

En av svårigheter med distribuerad generering är att sektionera nätet och begränsa spridning av störningar mellan olika delar av elsystemet dvs. förhindra att störningar som uppstår i t.ex. vindparken påverkar distributionssystemet och omvänt, störningar i distributionssystemet orsakar driftstörningar i vindparken. Exempel på sådana störningar är:

- Inkopplingstransienter
- Övertoner
- Spänningsdippar

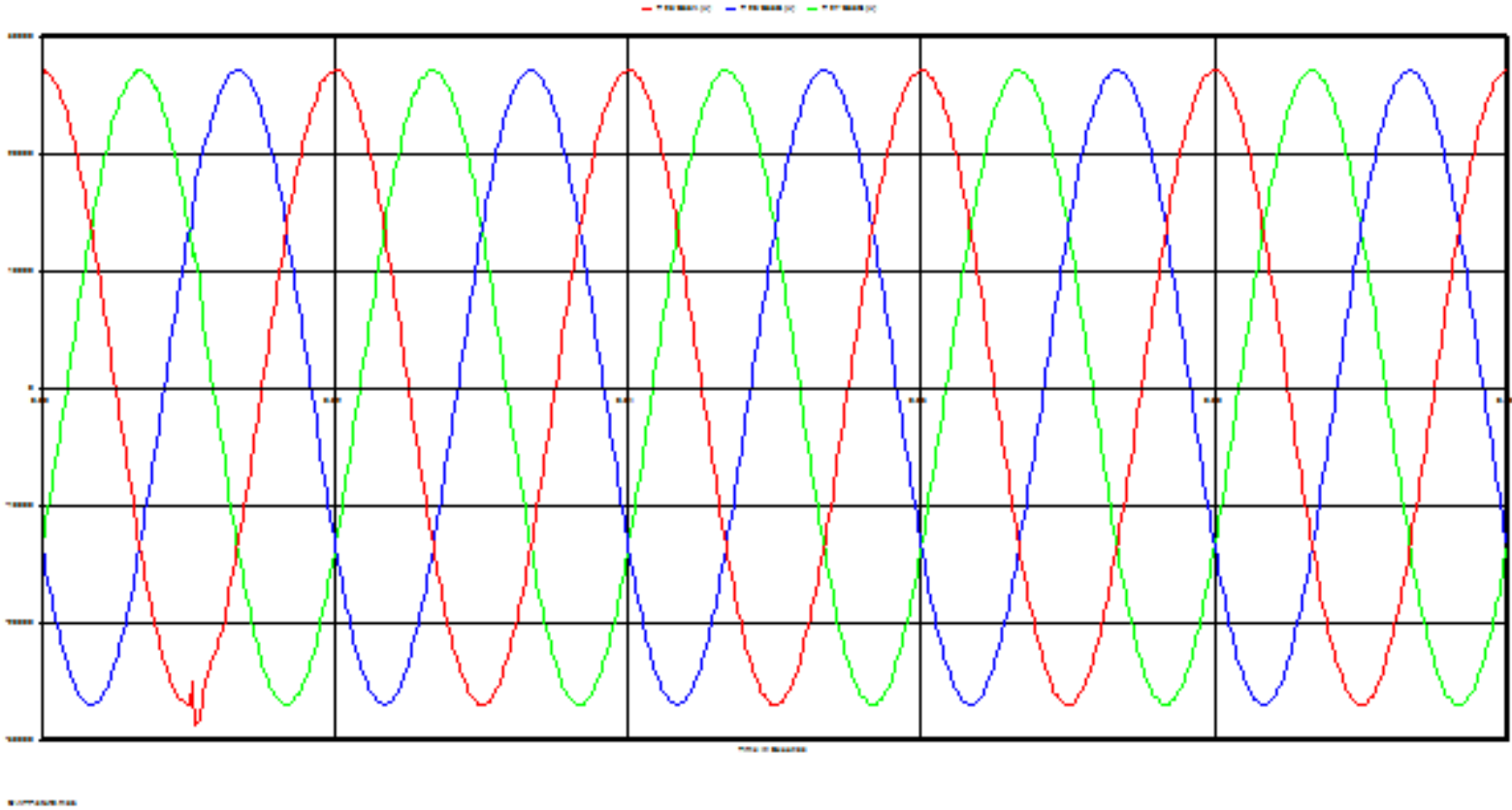
# PQA



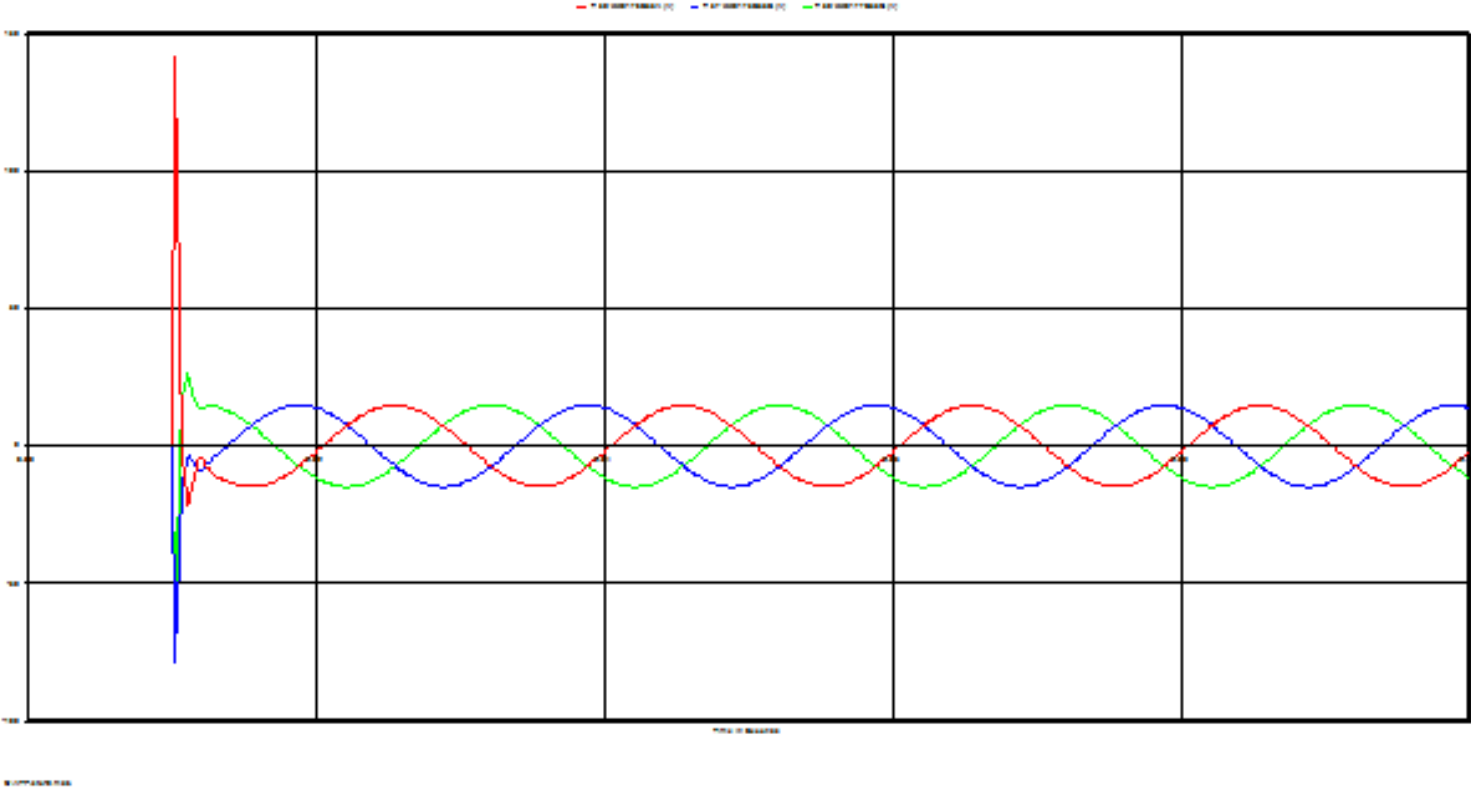
# Power Quality Adapter (PQA)

PQA är störningsbegränsare som effektivt förhindrar spridning av störningar inom nätet. PQA är en ström- och frekvensberoende impedans som kopplas i serie med valda linjer eller kablar. Vid 50 Hz och nominell last är dess impedans noll och PQA inverkar inte på ström-, spännings- eller lastflöde i nätet. Vid höga strömmar pga. av jordfel eller kortslutningar ökar PQAs impedans och begränsar felströmmen. På samma sätt begränsas högfrekventa störningar (övertoner och transienter) av PQAs höga övertonsimpedans

# Spänningstransient med PQA



# Strömtransient med PQA



# Sammanfattning

# Sammanfattning

Resultat av teoretiska studier och praktisk erfarenhet av elkvalitet i nät med distribuerad generering matande moderna, energieffektiva laster leder till följande slutsatser:

- Vind- och solgeneratorer kan inte absorbera övertoner eller transienter på samma sätt som stora kärnkraftsdrivna generatorer. Detta kräver effektiv filtrering och/eller blockering av störningar vid källan
- Dagens laster genererar högfrekventa övertoner vilket kräver filterlösningar med låg reaktiveffektgenerering och bredbandskaraktistik
- Långa kabelförbindelser bidrar med kapacitanser som skapar övertonsresonanser, ferroresonanser och orsakar höga , högfrekventa kopplingstransienter. Lämpligt dimensionerade dämpfilter kan förhindra driftsstörningar och haverier.
- Brandväggar i form av PQA kan installeras i kritiska punkter för att undvika okontrollerad spridning av störningar mellan olika delar av elnätet.