

Effekt och mätning av effekt

På senare tid har den begränsade tillgången av energikällor lett till ett ökat intresse för energifrågor. Ekonomi och effektivitet spelar numera en allt större roll inom el-industrin. Höga kostnader för att generera, överföra och distribuera energi skapar ett ökande intresse för att på ett effektivt sätt kunna övervaka och kontrollera förbrukningen av el.

El-industrins främsta mål är att alltid kunna tillgodose sina kunders varierande energibehov. Behovet av energi växer både i storlek och komplexitet i takt med ett ökat antal förändringar och utbyggnader av elnätet. Detta innebär att kostnaderna ökar. Mätning och övervakning av elnätet har blivit mer kritiska på grund av de höga kostnaderna för avbrott och materialfel.

Av ekonomiska skäl genererar elbolagen el med relativt hög spänning (> 1 kV). Hos konsumenterna omvandlas denna spänning sedan till lågspänning med hjälp av transformatorer.

Detta görs för att få en bättre säkerhet och tillgänglighet för både kommersiell och industriell användning.

Säkerhet är den viktigaste faktorn när det gäller energidistribution. För att få ett säkert eldistributionsnät för både människor och installationer krävs kunskap, förebyggande underhåll och tillgång till de mätinstrument som används för att övervaka och analysera elnätet.

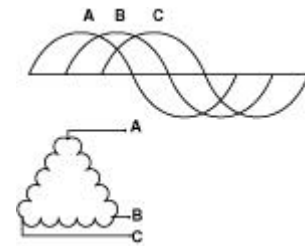
Några vanliga nät-konfigurationer

Enfas-nät

I ett enfassystem som försör bostadsområden med el består kablarna av 3 ledare (fas, neutralledare och skyddsjord) som matas med 230V.

Trefas-nät med 3 ledare

Denna typ av system matas med 230/400 V och kallas ofta för deltakopplat nät. Spänningen mellan ledarna är lika med transformatorspänningen. De tre strömförande ledarna har en inbördes fasförskjutning på 120°.



Figur 1: 3Ø- system med 3 ledare.

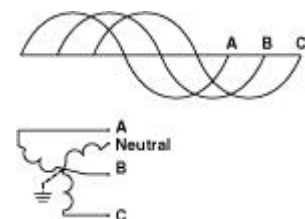
Trefas-nät med 4 ledare

Systemet kallas även för Y-kopplat system och matas med 230/400 V. Det har tre strömförande ledare med en inbördes fasförskjutning på 120° samt en neutralledare. I bostäder, kontor och andra mindre anläggningar brukar de flesta utrustningar anslutas mellan fasledaren och neutralledaren.

Typisk spänning:

Fas-fas = 400V

Fas-neutralledare = 230V



Figur 2: 3Ø- system med 4 ledare.

Symmetriska och icke symmetriska system

Ett växelströmssystem med fler än två ledare är symmetriskt belastat om det i varje ledare går lika mycket ström. Många system idag är icke-symmetriska eftersom någon fas drar mer eller mindre ström än de övriga. Detta inträffar ofta vid utbyggnader av elnätet utan hänsyn till jämn belastning mellan faser eller om många icke-linjära laster ansluts till samma system.

TRMS och RMS

Termen RMS (root-mean-square) används när man talar om växelström (AC). Det betyder "ekvivalent" eller "effektiv" och motsvarar den mängd arbete som en likström (DC) med ekvivalent värde utför.

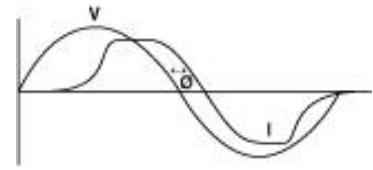
Termen RMS behövs för att kunna beskriva värdet på en växelström som ändrar amplitud och polaritet med regelbundna intervall. RMS mätningar ger en noggrannare bild av ström- och spänningsvärden, vilket är mycket viktigt för icke-linjära (störda) signaler.

Tidigare var de flesta belastningarna i elnätet linjära. För en linjär belastning är impedansen

konstant och oberoende av spänningen. I takt med att marknaden för datorer och olika motorer växer, har mängden icke-linjära belastningar i elnätet ökat avsevärt.

Mätning av en icke-sinusformad spänning och ström kräver ett "sant" RMS (TRMS) instrument. Vanliga instrument mäter medelvärdet av amplituden hos kurvan. Vissa av dessa instrument är programmerade att visa ekvivalent RMS ($0,707 \times$ toppvärdet). Denna typ av instrument visar endast en sann bild av kurvan om den är helt sinusformad (inga störningar får finnas). När störningar inträffar, ändras förhållandet mellan avläst RMS värde och TRMS värde avsevärt. Endast instrument som mäter TRMS värden ger en riktig bild av den icke sinusformade kurvan.

Vid mätning med ett TRMS instrument samplas signalen med en hög samplingshastighet. Instrumentet digitaliserar varje värde, upphöjer det i kvadrat och adderar det till föregående värde i kvadrat. Därefter beräknar det kvadratroten av detta totalvärde. Resultatet kallas för TRMS värde.



Figur 3: En icke-linjär strömkurva.

Energiförbrukning

Den mängd elektricitet som konsumeras i elnätet över tiden kallas för energiförbrukning.

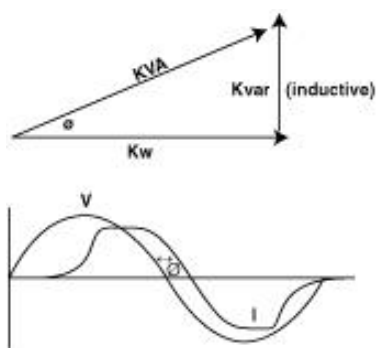
Om energiförbrukningen är oregelbunden måste elverken ha en högre kapacitet än vad som skulle krävas om förbrukningen var konstant. Det måste finnas kapacitet för att klara av snabba ökningarna i energiförbrukningen.

Watt och VAR ger en momentan bild av vad som händer i en krets vid en given tidpunkt. Eftersom dessa parametrar varierar kraftigt över perioden är det nödvändigt att integrera energiförbrukning med avseende på tiden. Den grundläggande storheten för att mäta energi är watt-timmar (Wh) eller ännu vanligare kilowatt-timmar (kWh). Värdet motsvarar förbrukningen av 1 000 W på en timme.

Effektfaktor

Effektfaktorn är kvoten mellan den aktiva effekten som används i en krets och den skenbara effekten som levereras av strömkällan. Aktiv effekt mäts i watt (W) eller kilowatt (kW). Skenbar effekt mäts i voltampere (VA) eller kilovoltampere (kVA). Skenbar effekt beräknas genom att multiplicera ström med spänning.

$$\text{Effektfaktor} = \frac{\text{Aktiv effekt (kW)}}{\text{Skenbar effekt (kVA)}}$$



Figur 4: Beräkning av effektfaktorn.

Vissa belastningar (t.ex. induktiva motorer) skapar en fasförskjutning eller fördröjning mellan strömmen och spänningen. En induktiv belastning förskjuter strömmen i förhållande till spänningen med en vinkel. Denna vinkel kallas för fasvinkel ϕ .

För helt resistiva belastningar är det ingen fasförskjutning mellan strömmen och spänningen. Fasvinkeln ϕ blir således 0 grader.

Exemplen som följer illustrerar effektfaktorn vid olika typer av belastningar.

Exempel 1: I en lödkolv är den skenbara effekten som levereras från strömkällan direkt omvandlad till värme (aktiv effekt). I detta fall är aktiv och skenbar effekt lika stora, vilket innebär att effektfaktorn är 1.

Exempel 2: För en enfasmotor är den aktiva effekten summan av flera komponenter:

- arbetet som utförs i systemet, t.ex. lyft med kran, flytta luft med en fläkt eller förflyttning av material på ett transportband.
- värmeutveckling på grund av effektförluster i motorlindningar.
- värmeutveckling i järn på grund av virvelströms- och hystereseförluster.
- friktionsförluster i motorlager.
- vindförluster (friktion) vid motorrotation.

Vi kan nu observera att för en enfasmotor är den skenbara effekten högre än den aktiva effekten. Effektfaktorn är således mindre än 1.

Effektfaktorn visar skillnader som finns mellan olika belastningar. Lödkolven är en helt resistiv belastning som drar lika mycket ström som den sedan omsätter i värme. Strömmen kallas aktiv ström eftersom den direkt bidrar till produktionen av aktiv effekt. Enfasmotorn däremot representerar en delvis induktiv belastning som består av en aktiv ström som omvandlas till aktiv effekt och den magnetiseringsström som skapar det magnetiska fält som krävs för att driva motorn. Den magnetiserande strömmen som kallas för reaktiv ström, motsvarar det energiutbyte mellan strömkällan och motorn som inte omvandlas till aktiv effekt.

Reaktiv effektkompensering

Reaktiv effektkompensering innebär de kapacitiva värden som krävs för att korrigera en låg effektfaktor så att den blir så nära 1 som möjligt.

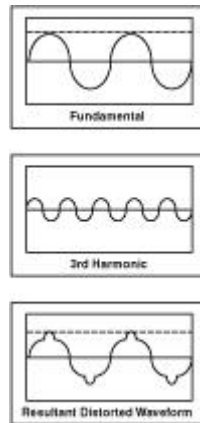
De flesta industriella belastningarna är induktiva, vilket innebär att strömmen förskjuts ned några grader i förhållande till spänningen. För att få upp effektfaktorn till 1 kan man ansluta en kondensator parallellt med belastningen. Eftersom kondensatorn inte förbrukar någon effekt kommer belastningseffekten att vara densamma.

Övertoner

Tidigare var el-kvalitet ett mått på elbolagens förmåga att leverera el till sina kunder utan avbrott. Numera omsluter även begreppet alla avvikelser från rena sinusvågor, dvs. transienter och kontinuerliga störningar. Övertoner är ett exempel på kontinuerliga störningar med oönskat resultat. Övertoner kan finnas på strömmar och/eller spänningar. Uppskattningsvis drivs 60 % av alla elektriska apparater med icke-linjär ström.

Elbolagen investerar stora summor pengar varje år för att försäkra sig om att den spänning som levereras är så sinusformad som möjligt. Om användaren ansluter resistiv belastning (t.ex. glödlampor) till systemet kommer även den

resultaterande strömmen att vara sinusformad. Om belastningen är icke-linjär, vilket är det vanligaste fallet, kommer strömmen att gå i korta pulser och strömkurvan blir störd. Den totala strömmen är summan av grundtonen och alla övertoner.



Figur 5: Sammansatt kurvform.

Övertoner kan orsaka allvarliga problem. De kan utlösa överspänningsskydd, medföra överhettning i transformatorer, neutralledare och motorer, samt fel i kondensorer. Övertoner kan orsaka problem som är lätta att upptäcka men svåra att diagnostisera.

Det har blivit allt viktigare att förstå orsakerna till övertoner och att kunna upptäcka och övervaka närvaron av skadliga övertoner. Inom ett

elsystem varierar övertonerna mycket mellan olika delar. Övertoner kan samverka med systemet genom direkta systemanslutningar eller genom kapacitiv eller induktiv koppling.

En överton kan definieras som en heltalsmultipel av grundfrekvensen och tilldelas en ordning. Med en grundfrekvens på 50 Hz har den andra övertonen frekvensen 50×2 Hz, dvs. 100 Hz. Den tredje övertonen har frekvensen 150 Hz, osv.

Elektrisk utrustning som är icke-linjär skapar övertoner. Den icke-linjära beskaffenheten gör att den drar ström som inte följer vågformen på spänningen. Elektronisk utrustning är ett bra exempel. Även om detta är en bred kategori som innefattar många olika typer av utrustning så har de flesta en egenskap gemensam. De har alla en inbyggd likströmskälla (DC) för strömförsörjning.

Belastningar som ger upphov till strömövertoner inkluderar följande:

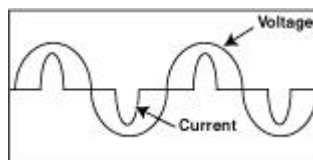
- Elektroniska ljusregulatorer
- Variabla hastighetskretsar
- Datorer
- Elektrisk svetsutrustning
- Likriktare
- Regulatorer
- Mättade transformatorer
- Medicinteknisk utrustning

Detta är inte en komplett lista med utrustning som ger upphov till övertoner. All elektronikbaserad utrustning kan misstänkas ge upphov till övertoner.

På grund av den ökande användningen av elektronik har andelen utrustning som ger upphov till strömövertoner ökat avsevärt. Problem med övertoner växer med den ökade användningen av dioder i elektronisk utrustning. Denna typ av utrustning förbrukar en kort strömpuls endast vid toppvärdena i sinuskurvan. Resultatet av detta blir att högfrekventa övertoner uppstår på grundfrekvensen 50 Hz.

Övertonerna skapas av diodkondensatoringången som omvandlar växelström

till likström. Kretsen tar bara ström från nätet endast vid toppvärdena på spänningskurvan. På så sätt laddas kondensatorn med spänningens toppvärde. Utrustningen matas med likström från kondensatorn och på så sätt blir strömkurvan störd.



Figur 6: Icke-linjär ström.

Övertoner i elsystemet skapar tillsammans med grundfrekvensen störningar. Störningsnivån har ett direkt samband med frekvensen och amplituden hos strömövertonen.

Bidraget av alla strömmens övertonsfrekvenser till grundfrekvensen kallas för total övertonshalt eller THD (Total Harmonic Distortion). THD värdet mäts i procent av grundtonen. Ett THD värde över 10 % är inte bra.

THD värdet beräknas som roten ur summan av alla övertonsfrekvenser delat med grundfrekvensen (50 Hz). Beräkningen ger störningsvärdet i procent av grundtonen. Matematiskt är THD % kvoten mellan

summan av övertonernas RMS värde och RMS värdet hos grundtonen, uttryckt i procent.

En annan användbar parameter är distorsionsfaktorn eller DF %. Distorsionsfaktorn är den totala övertonshalten som funktion av den totala RMS signalen. THD beräknas i procent och kan inte vara större än grundtonen. DF värdet kan aldrig överstiga 100 %. Termen är mycket användbar och finns även med i den internationella standarden IEC-555. Matematiskt är DF % kvoten mellan summan av övertonernas RMS värde och RMS värdet hos den sammansatta signalen, uttryckt i procent.

Där det finns en stor mängd icke-linjär belastning finns det också övertoner i eldistributionsnätet. Övertonsskapande utrustning finns i flera olika miljöer, från kontor till fabriksbyggnader.

I fabriksmiljöer är elektriska effektomvandlare såsom variabla hastighetskretsar den största källan till uppkomsten av övertoner. Det är inte ovanligt att ha

THD nivåer på upp emot 25 % i vissa industrimiljöer. Övertoner kan skapa en mängd problem. Några exempel är överbelastning i kablar, transformatorer och motorer.

Kontorsutrustning med en fas matas ofta med icke-linjär ström. Den största källa till uppkomsten av övertoner i kontorsmiljöer är datorutrustning. Även fluorescerande ljus med elektrisk belastning och många andra typer av kontorsutrustning är bidragande källor. Även om THD nivåerna är högre i industriella miljöer än i kontorsmiljöer är känsligheten för förändringar i el-kvaliteten hos kontorsutrustning extremt hög.

I industriella miljöer kan det finnas en stor mängd trefas icke-linjära belastningar. De mest oönskade övertonsfrekvenserna är de som är udda multipler (tre, fem och sju) av grundfrekvensen. Den tredje övertonen (150 Hz) är den överton som kan bidra till mest störningar. Eftersom övertonsfrekvenser alltid är högre än grundfrekvensen 50 Hz blir även yteffekter en faktor. Yteffekter är ett fenomen där den högre frekvensen

medför att elektroner kommer att börja förflyttas i riktning mot ledarens hölje. Detta minskar kraftigt ledarens diameter därigenom minskas kabelns kapacitet. Yteffekten ökar med frekvensen och amplituden. Som ett resultat av detta orsakar högre övertonsfrekvenser en högre grad av överhettning i ledare.

I balanserade trefassystem utan övertoner har de tre faserna har en inbördes fasförskjutning på 120°. De tar således ut varandra och mycket lite ström kan gå i neutralledaren. När det uppstår störningar på någon av faserna ökar övertonsströmmarna och faserna kommer inte att ta ut varandra i samma utsträckning. Resultatet blir att strömmen i neutralledaren ökar avsevärt. Övertonerna med udda multiplar av tre (tre, nio, femton) adderas i neutralledaren och kan snabbt orsaka farlig överhettning.

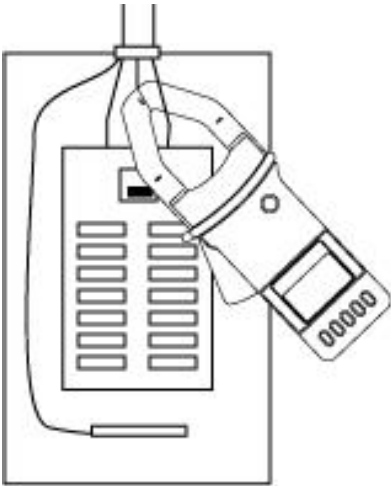
Teoretiskt sett är den största ström som kan gå i neutralledaren 1,73 x fasströmmen. Om ledaren inte dimensioneras på rätt sätt kan den överhettas. Om neutralströmmen är högre än normalt medför detta ett spänningsfall mellan

neutralledaren och jord som är högre än normalt. Värdet på över fyra volt indikerar en hög neutralström.

Felaktigt utlösta strömbrytare är ytterligare ett problem som uppstår med högre övertonsfrekvenser. Toppvärdeskännande strömbrytare löses ofta ut även då maximalt strömvärde inte har uppnåtts. Toppvärdet för strömövertoner kan vara många gånger högre än sinuskurvas toppvärde.

Att upptäcka och mäta övertoner

Övertonsanalys innebär att mätningar utförs för att identifiera frekvenser och omfattning av övertonsströmmarna som genereras av elektronisk utrustning. De flesta problemen med icke-linjära övertoner kan avläsas direkt på mätinstrumentet. En hög ström i neutralledaren kan upptäckas med hjälp av en TRMS multimeter.



Figur 7: Mätning med tångampmeter.

Mät strömmens RMS värde för varje fas och neutralledaren. Jämför det uppmätta värdet på neutralledaren med förväntat strömvärde om faserna är obalanserade. Om fasströmmarna är lika kommer vektorsumman av neutralströmmen att bli noll. Om det finns stora mängder av övertoner av ordningen 3, 9, 15, etc. i neutralledaren, kan neutralströmmen vara högre än fasströmmen.

Det kan även vara användbart att mäta spänningens THD värde. IEEE standard 519-1992 specificerar både maximal övertonshalt och rekommenderade korrektionsnivåer.

Vid en övertonshalt på 5 % börjar övertonerna få en betydande effekt på eldistributionsnätet.

Mätning av strömövertoner definierar karakteristiken hos belastningen som ger upphov till övertonerna. Mätning av ström ska således göras så nära belastningen som möjligt.

Spänningsövertonerna definierar hur systemet reagerar på övertonerna och mäts vanligen i elskåpen.

Effekter på systemet

Strömövertoner har en negativ effekt på elsystemet. Strömmen genom den icke-linjära belastningen påverkar enligt Ohms lag systemets impedans vilket gör att spänningsövertoner skapas.

En högt belastad transformator påverkas av att en av kretsarna matar en icke-linjär belastning. Spänningsövertonerna som skapas kan sedan överföras till alla övriga kretsar som matas med samma transformator.

Spänningsövertoner kan skapa problem i ett system. Motorer anses ofta vara linjära belastningar men om spänningskällan innehåller en stor mängd övertoner kommer motorn att dra en ström med övertoner.

Resultatet blir att motorns drifttemperatur ökar och dess livslängd minskar.

Olika övertoner kan orsaka rotationsfält i motorn. Beroende på frekvensen kommer motorn att rotera i motsatt riktning (negativt vridmoment). Det är framförallt den femte övertonen som har denna påverkan på motorn.

Brus kan finnas i kommunikationsutrustning och telefonsystem när övertoner på ljud- eller radiofrekvenser kopplas (induktivt eller kapacitivt) till kommunikations- eller datanät.

Transformatorer och k-faktorn

De flesta transformatorer baserar sin drift på ostörda 50 Hz signaler. När signalerna innehåller mycket övertoner kan det leda till försämrad drift eller haveri.

K-faktorn mäts på transformatorer för att kontrollera att inte farlig överhettning ska uppstå om transformatorer matar belastningar med mycket övertoner. K-faktorn är ett mått på transformatorns förmåga att hantera icke-linjär belastning utan

onormal överhettning. Ett högt värde på k-faktorn innebär att transformatorn har en god förmåga att hantera övertoner.

Avläsning av mätinstrumentet

Problem med övertoner kan analyseras på ett enklare sätt om rätt mätinstrument används. Begreppet sant RMS värde (TRMS) motsvarar den mängd arbete som en likström (DC) med ekvivalent värde utför.

Det krävs ett TRMS instrument för att noggrant kunna mäta på ett system där övertoner förekommer. Vid mätningar med ett instrument som endast mäter medelvärden (RMS) blir resultaten felaktiga. Instrumentet kan visa värden på mellan 25 % och 45 % under det riktiga värdet om övertoner förekommer. Många instrument på marknaden visar medelvärden och toppvärden genom att multiplicera mätvärdet med 1,11 respektive 0,707. Dessa instrument visar bara ett

korrekt värde om signalen är helt sinusformad.

TRMS instrument samplar signalen vid många olika tidpunkter och ger en noggrann och tillförlitlig bild även av störda signaler. Inbyggda mikroprocessorer samplar, digitaliserar och kvadrerar varje sampel. Värdet adderas det till föregående sampel i kvadrat och därefter beräknas kvadratroten ur summan. Resultatet blir ett TRMS värde, oavsett mängden störningar på signalen.

Crestfaktor

Crestfaktorn är kvoten mellan signalens toppvärde och RMS-värdet.

$$\text{Crestfaktor (CF)} = \frac{\text{Toppvärde}}{\text{RMS-värde}}$$

Ett instruments crestfaktor indikerar den nivå av signalförvrängning som instrumentet kan hantera utan att mätfel uppstår. För en ren sinusvåg är crestfaktorn 1,414. Ju högre värde på crestfaktorn instrumentet kan mäta, desto bättre klarar det

av att mäta komplexa signaler. När övertoner förekommer kan crestfaktorn vara mindre än (CF för en fyrkantsvåg är 1) eller större än 1,414.

Att begränsa effekterna av övertoner

Filtrering är numera den vanligaste metoden för att begränsa effekterna av övertoner. Filter består vanligtvis av anpassade LC-kretsar, vars impedans kan försummas i förhållande till resten av systemet. Filtret dimensioneras med avseende på både RMS strömmen och övertonsströmmen.

Framtidens system

Hur framtidens system kommer att se ut kan vi än så länge bara spekulera i. Kanske kommer systemet att kunna generera signaler som har samma amplitud som övertonen men med motsatt fas. På så sätt skulle övertonernas negativa effekter kunna motverkas.