

Kort genomgång av effektberäkningar för lågenergilampor och andra olinjära laster

Math Bollen
Martin Lundmark
Christer Boije
John Åkerlund

Datum
2009-05-30

Kort genomgång av effektberäkningar för lågenergilampor och andra olinjära laster

Luleå tekniska universitet, Elkraft, Campus Skellefteå
2009

Math Bollen, Martin Lundmark, John Åkerlund, Christer Boije

Rapporten har tagits fram på Energimyndighetens uppdrag,
beställare Peter Bennich.

Sinusformig spänning och ström

En spänning med momentana spänningsvärdet

$$u(t) = \sqrt{2} U \sin(\omega t) , \text{ där } U \text{ är spänningens effektivvärde,}$$

som matar en linjär last ger en momentan ström som är

$$i(t) = \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi) , \text{ där } I \text{ är strömmens effektivvärde.}$$

φ är fasvinkeln mellan spänning och ström och beror på om lasten är resistiv (noll), induktiv (positiv) eller kapacitiv (negativ).

$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ blir då den aktiva effekten i den linjära lasten. Mäts i watt (W).

$S = U \cdot I$ kallas för skenbar effekt med enheten voltampere (VA) medan

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi \text{ är lastens } \underline{\text{effektfaktor}}.$$

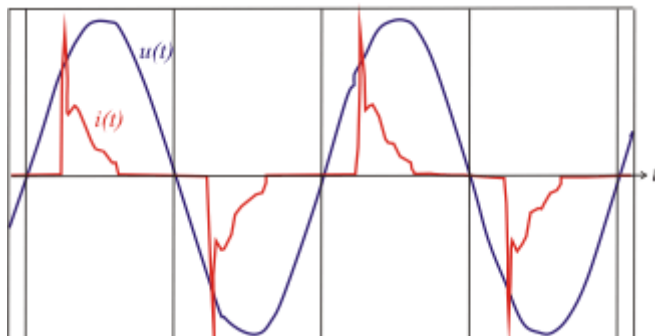
Dessa begrepp och definitioner är välbekanta för de flesta, men gäller bara vid linjära laster, således ej för lågenergilampor, datorer osv.

Begreppet reaktiv effekt har ofta använts förr men leder till missuppfattningar så fort som lasten blir olinjär. Det undviks därför helt i det följande.

Olinjära laster

Tidigare var linjära laster det vanligaste. Både glödlampor, värmelement, spisar och motorer kunde nästan alltid betraktas som linjära laster.

Numera har vi en starkt ökande mängd olinjära laster både i hushåll och industri. Exempel på sådana är lågenergilampor, TV-apparater, datorer, varvtalsreglerade elmotorer, induktionsspisar, ljusdimmers och mycket annat som kan betecknas som ”elektroniska laster”. Gemensamt för dessa är att de är konstruerade på sådant sätt att om de matas med en sinusformad spänning, så uppvisar strömmen genom dem ingen sinusform och i många fall är strömmen långt ifrån någon en sinusform. Ett exempel visas i figuren.



Detta brukar kallas att strömmen innehåller distorsion (distorderad = förvrängd).

Då gäller inte längre ovanstående samband mellan aktiv, reaktiv och skenbar effekt.

Figuren visar spänning och ström för en lågenergilampa

Allmänt

Om man lämnar föreställningen att strömmar och spänningar är sinusformiga så måste man använda de mer grundläggande definitioner som gäller för både sinusformiga och icke-sinusformiga strömmar och spänningar. Det gäller t ex att spänningens, resp. strömmens effektivvärden beräknas som det kvadratiska tidsmedelvärdet av de momentana ström- och spänningsvärdena:

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{nT} \cdot \int_0^{nT} u^2(t) dt} \text{ (enhet V)} \text{ och } I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{nT} \cdot \int_0^{nT} i^2(t) dt} \text{ (enhet A),}$$

där T är periodtiden och n är ett positivt heltal.

$p(t) = u(t) \cdot i(t)$ är momentana effekten

medan medeleffekten är medelvärdet av momentana effekten över en eller flera perioder:

$$P = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} p(t) dt \text{ (enhet W)} \text{ Detta är } \underline{\text{den aktiva effekten}}. \text{ Definitionen gäller oberoende av}$$

kurvformen.

$S = U_{RMS} \cdot I_{RMS}$ blir den skenbara effekten (enhet VA).

$\text{Effektfaktor} = \frac{P}{S}$ (Här kan vi inte använda $\cos \varphi$ enligt den förra definitionen)

Detta stämmer ju bra även med definitionerna för linjära belastningar (sinusform). Sambanden som givits för dessa är specialfall av de allmänna enligt ovan.

Mätning

Det kan tyckas att ovanstående formler är abstrakta och svåra att använda för beräkningar, men det är faktiskt så att många moderna mätinstrument använder just dessa beräkningsgrunder.

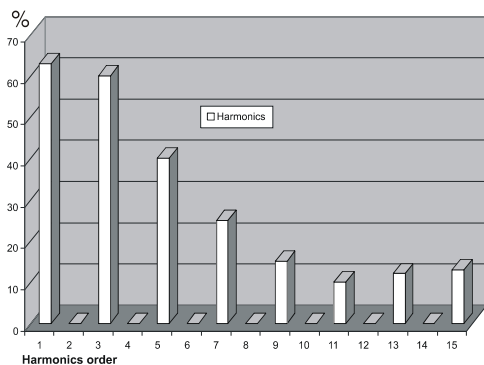
Det är relativt enkelt att med hjälp av samplande kretsar mäta ögonblicksvärden av spänning och ström med mikrosekunders intervall och sedan programmässigt utföra beräkningarna med hjälp av interpolationer och styckevis linjär integration (piecewise linear integration). Detta ger mätvärden med mycket god noggrannhet oberoende av kurvform.

Uppdelning av spänning och ström i grundton och övertoner

Det finns emellertid ett annat betraktelsesätt för distorderade kurvformer som kan underlätta både mätning, hantering och förståelse.

Enligt fourierteorin kan man dela upp en godtycklig elektrisk kurvform i ett antal komponenter: likströmsnivå samt grundton och övertoner med sinusform och var sin amplitud. Detta grundar sig på föregående allmänna definitioner.

Om det inte finns någon likströmskomponent och om belastningen är symmetrisk kring sin mittlinje, vilket är vanligt, kommer det att enbart finnas grundton (x_1) plus ett antal udda övertoner (x_3, x_5, x_7, \dots osv.).



Grundton och övertoner för strömmen till ett typiskt datorkraftaggregat med sk passiv PFC.

Symmetrikravet (dvs. att lasten uppför sig likadant för positiva och negativa inspänningsvärden) uppfylls t ex om lasten har en helvågslikriktare (brygga) på ingången, något som ofta förekommer. Då blir alltså alla jämna övertoner lika med noll. Endast udda toner blir kvar, där grundtonen får ordningsnumret 1 och har frekvensen lika med nätets 50 Hz. Tredjetonen har på motsvarande sätt frekvensen 150 Hz osv. Någon andraton finns inte.

Fördelen med detta betraktelsesätt är att man kan behandla varje frekvenskomponent för sig vid beräkning av aktiva effekten.

Om t ex spänningens 5:e ton har effektivvärdet U_5 och strömmens 5:te ton har effektivvärdet I_5 och ligger φ_5 grader fasförskjuten i förhållande till spänningen av samma frekvens så är

$$P_5 = U_5 \cdot I_5 \cdot \cos \varphi_5 \text{ den aktiva effekt som genereras av 5:te tonen.}$$

Observera att endast spännings- och strömtoner med lika ordningsnummer bildar aktiv effekt.

$$P = P_1 + P_3 + P_5 + P_7 + \dots \text{ är den totala aktiva effekten.}$$

Effektivvärdet av spänning resp. ström beräknas som

$$V_{RMS} = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2 + \dots + U_N^2} \text{ och } I_{RMS} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots + I_N^2} .$$

$S = U_{RMS} \cdot I_{RMS}$ och Effektfaktor = $\frac{P}{S}$ blir den skenbara effekten respektive effekt faktorn på samma

sätt som förut.

Man brukar definiera övertonshalten i strömmen enligt

$$THD = \frac{I_H}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I_{RMS}}{I_1}\right)^2 - 1} \quad \text{THD - "Total Harmonic Distortion" (\%)}$$

där $I_H = \sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots + I_N^2}$, dvs. effektivvärdet av enbart övertonerna.

Distorsionens betydelse för effekter och förluster

I regel medför distorsion i strömmen att även spänningen blir distorderad i någon mån. Om man har ett "starkt" matande nät (=låg inre impedans) blir denna distorsion oftast försumbar.

Strömmen är distorderad, medan spänningen fortfarande är i det närmaste sinusformad. Då bidrar inte strömmens övertoner till den aktiva effekten eftersom $U_3, U_5, U_7, \dots = 0$.

Däremot kommer övertonerna i strömmen att öka strömmens effektivvärde (enl ekvationen ovan), vilket ökar den skenbara effekten. Vid samma aktiva effekt kommer effekt faktorn därmed att minska. En hög övertonshalt (THD) i strömmen ger alltså en låg effekt faktor.

Spelar då detta någon roll?

Ja, övertonsströmmarna måste slutas på något sätt. De går via matningsledningarna till lågspänningstransformatorn och vållar förluster både där och i ledarna. En viss del sluts förmodligen via andra anslutna belastningsobjekt, men detta är sannolikt en mindre del eftersom den matande transformatorns impedans är låg i förhållande till andra belastningsobjekt, åtminstone för övertoner av lägre ordningsnummer.

Förlusterna i matningsledningarna är proportionella mot I^2 .

Strömmens THD kan ofta uppgå till 60% eller däröver hos laster som finns i vanliga hushåll, t ex lågenergilampor och kraftenheter för datorer. Man ska dock hålla i minnet att dessa i sig drar ganska lite effekt jämfört med andra alternativ och att konsumenten endast betalar för den aktiva effekten via sin elmätare.

Exempel: Ett hushåll med 21 st. 60 watts glödlampor, 7 i varje fas, byter ut dessa mot lika många 11 watts lågenergilampor, vilka ger ungefär samma ljusutbyte. Aktiva effekten minskar från 1260 watt (med 1,8 ampere ström per fas, sinusformad) till 231 watt (grundton $I_1 = c:a$ 0,33 ampere, övertoner $I_H =$ cirka 0,3 ampere, ger c:a 0,45 A effektivvärde per fas). Matningsledningarnas förluster (aktiv effekt) minskar enligt ovan till ungefär $I_{\text{efter}}^2 / I_{\text{före}}^2 \approx 6\%$ av de tidigare ledningsförlusterna.

Effektförbrukningen från belysningen sjunker med över 1000 W och ledningsförlusterna sjunker med 94 % på lampbytet!
En bra vinst för hushållet och samhället!

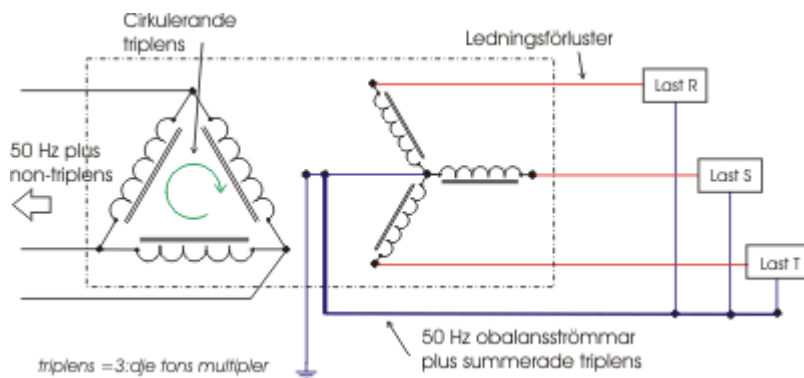
Trefaseffekter

För trefas tar grundtonerna normalt ut varandra i neutralledaren, om belastningen är någorlunda jämnt fördelad mellan faserna. Följaktligen går det vid linjära laster endast små obalansströmmar i neutralledaren.

När det gäller olinjära laster däremot uppträder fenomenet att övertoner av ordningen 3, 9, 15 etc. (sk. "triplens") ligger i fas och adderas i neutralledaren.

Förlusterna växer alltså och det finns anledning att tro att nollledarna bör förstärkas, om och då olinjära belastningsobjekt blir dominerande i hushåll och (framför allt) industrier. Dimensioneringen av neutralledaren behöver i många fall vara så att den klarar till och med en större ström än fasledarna.

Redan nu dubblar man ibland nollledarna, t ex vid projektering av datahallar och servercentraler.



Lågspänningsdistribution med transformator. Figuren avser att visa vart övertonsströmmarna tar vägen samt att 3:dje-tonskomponenterna adderas i neutralledaren.

Mätinstrument

Vi har redan konstaterat att det finns effektmätinstrument baserade på de allmänna definitionerna, utnyttjande sampling och numerisk integration.

Det finns även gott om mätinstrument som gör övertonsanalyser och använder de principer som angivits i det avsnittet.

Dessa typer av instrument ger i regel en hyfsad bild av verkligheten, men det finns all anledning att se upp vid mätning eftersom fällorna är många.

Om man däremot försöker använda vanliga analoga eller digitala universalinstrument (effektivvärdesmätande eller inte) för mätning på olinjära belastningar får man vara försiktig med tolkningar av resultat, framförallt när man mäter ström.

Hur ökar man effektfaktorn?

Som visades förut, så är effektfaktorn förhållandet mellan den aktiva effekten och den skenbara effekten. Den aktiva effekten anger hur mycket användbar effekt som överförs, medan den skenbara effekten är ett mått på hur mycket det påverkar nätet. Effektfaktorn kan därför betraktas som ett effektivitetsmått på energitransporten. Ju högre effektfaktorn är desto högre blir effektiviteten. En lägre effektfaktor ger bland annat högre förluster i nätet vid samma effektöverföring.

Det finns två sätt att förbättra effektfaktorn. Dels att minska fasvinkeln mellan spänningens och strömmens grundton, vilket kallas för "faskompensering". Här finns sedan länge välbeprövade lösningar, som kondensatorbatterier och shuntreaktorer, men det finns även nya utvecklingar, bland annat baserade på kraftelektronik. Det andra sättet att förbättra effektfaktorn är att minska strömmens distorsion. Det kallas för övertonsfiltrering.

Hur minskar man distorsionen?

Det finns flera olika sätt att utföra övertonsfiltrering, som alla har sina för- och nackdelar, och experterna har olika åsikter om vilken lösning som är den bästa.

Det ska dock påpekas att distorsion i spänning och ström i de flesta fall är tillräckligt låg för att det inte ska uppstå några negativa konsekvenser. De kan också vara så små att det inte är värt att förbättra situationen. Under flera år var behovet av övertonsfiltrering begränsat till industriella anläggningar. Numera är det i många fall elektroniska lågeffektlaster i hushåll och i kontorsområdet, som bidrar mest till distorsionen. Det finns begränsningar i produktstandarder för hur mycket distorsion en last får generera. I de internationella standardiseringsorganen diskuteras frågan löpande.

Det finns ändå en rädsla bland experter att ökningen av mängden elektroniska laster i framtiden kan leda till oacceptabla nivåer på distorsion av spänning och ström. Om det skulle inträffa så behövs det ytterligare åtgärder och kanske nya sätt att bygga elnät på. Bland annat diskuteras användning av likström i lågspänningsdistribution, som ett möjligt alternativ. Det skulle lösa många av de problem som elektroniska laster skapar i nuvarande eldistribution.

Utbytet av glödlampor mot lågenergilampor, som nu är aktuellt, ger dock inget större problem beträffande distorsionen. Eftersom strömmens effektivvärde kraftigt minskas så ger det samtidigt utrymme för en ökad distorsion av strömmen. Som visades i räkneexemplet kommer nettoeffekten att bli positiv för såväl kunden, elnätet och samhället.

Tryck: Universitetstryckeriet, Luleå

ISSN: 1402-1536

ISBN 978-91-86233-66-2

Luleå 2009

www.ltu.se