

ØKODESIGNFORSKRIFTEN FOR KRAFT- OG FORDELINGSTRANSFORMATORER

Av Nemanja Grubor og Kårstein Longva, Møre Trafo AS

Sammendrag

Europaparlamentet har i Direktiv 2009/125/EF etablert et rammeverk for økodesignkrav for energi-relaterte produkter. Kraft- og fordelingstransformatorer har betydelig potensiale for forbedring når det gjelder energisparing og miljøpåvirkning. Økodesignforskriften er fortsatt i en utviklings- og godkjennings-fase, og er planlagt å gjelde fra juli 2015. Dette gir utfordringer for brukere, leverandører og produsenter av transformatorer.

1. ØKODESIGNDIREKTIVET [1] OG TRANSFORMATORER

Økodesignkonseptet har til hensikt å redusere miljøbelastningen fra elektrotekniske produkter. Ved å sette klare krav til energieffektivitet, ønsker man å påvirke produktenes designfase og den totale livssyklus. Antallet transformatorer i bruk er enormt. Transformatorer er viktige komponenter i elektrisitetsforsyningen. Strømforbruket vokser stadig, og gir økende etterspørsel etter nye transformatorer. Samtidig er det nødvendig å erstatte transformatorer som har vært i bruk i flere tiår.

2. ØKODESIGN FORBEREDENDE STUDIE [2]

Det første trinnet i vurderingen, er hvilke økodesignkrav som bør settes for et bestemt produkt. En forberedende studie ble utført for den Europeiske Kommisjonen. Prosjektrapporten ble offentliggjort i januar 2011.

Den forberedende studien var fokusert på fordelingstransformatorer (DT) og krafttransformatorer (PT). Studien inkluderte en livssyklusanalyse av transformatorer fra ulike perspektiver: markedsanalyse, forbruketatferd, beste tilgjengelige teknologier og forbedrings-potensial i forhold til å forbedre energieffektiviteten og redusere miljøpåvirkningene. Prosjektets realisering inkluderte en

bred konsultasjon og samarbeid med bransjeorganisasjoner, brukere og produsenter av disse produktene og andre interessenter.

For hver fase av livssyklusen til transformatorer, er miljømessige aspekter blitt vurdert og følgende miljøparametere identifisert:

- støy,
- elektromagnetiske felt (EMF),
- bruk av farlige materialer i transformatorer,
- transformator tapene (tomgangstap P_0 , belastningstap P_k og andre tap P_{aux})

Viktige prestasjons- og effektivitetsparametere for transformatorer er:

- Merkeytelse S_r – er den viktigste transformator parameteren;
- Belastningsfaktor (α);
- Tapene (P_0 , P_k , P_{aux}) og effektivitet η ;
- Effektfaktor (PF);
- Volum, dimensjoner og transformatorens vekt;
- Kortslutningsimpedans, merkespenning, koblingsgrupper, isolasjons-/temperaturklasse, beskyttelsesklasse (IP)
- Lydeffektnivå (støy) fra transformatoren L_{wA} (dB (A))
- Brann-, miljø- og klima-klasser (kun for tørre transformatorer)

Den forberedende studien var basert på 7 basistilfeller av transformatorer (se på tabell 2). Det var nødvendig å ha noen forutsetninger, samt å begrense studien til ikke å dekke alle mulige alternativer og konsekvenser for å redusere kompleksiteten.

2.1 Normer og tester

Teknisk kvalitet og utførelse for transformatorer defineres i:

- EN (IEC) 60076-1 Transformatorer – Generelt. Design, krav til tester og toleranser;
- EN 50464-serien, Tre-fase olje-transformatorer 50Hz, fra 50kVA til 2500kVA, $U_m \leq 36kV$, Olje DT er delt inn i klasser A_k , B_k , C_k og D_k henhold til P_k og A_0 , B_0 , C_0 , D_0 og E_0 henhold til P_0 per merkeytelse S_r . A_k og A_0 er best (laveste tap);
- EN 50541-1:2011, Tre-fase tørre-transformatorer 50Hz, fra 100kVA til 3150kVA, $U_m \leq 36kV$ -Del 1: Generelle krav, Tørre DT er delt inn i klasser henhold til P_k og P_0 per merkeytelse S_r ;

2.2 Marked, salg og effektivitetsklasse med energitap data [3]

Den mest brukte statistikken av transformatorer i drift kommer fra Europroms-Prodcom og bransjeforening T&D Europe. Statistikken viser at antall installerte DT i Europa i 2009 var over 5 millioner enheter. Antatt salgskvantum er rundt 250000 enheter per år. EU har over 65000 PT installert og over 1300 enheter i årlig salg. Et estimat på totalt investert beløp på transformatorer i 2005 innenfor EU-27 er 3942 millioner €.

Det totale antall solgte DT og PT er godt over 200000 enheter per år som er direktivets krav til regulering.

DT har en gjennomsnittlig økonomisk levetid på 30 til 40 år. For PT er gjennomsnittlig økonomisk levetid lengre enn 30 år.

Tabell 1: EUs klasser av tilgjengelige transformatorer

	E ₀ - -	D ₀ -	C ₀	B ₀ +	A ₀ + +
D _k - -		160-250kVA	50-100kVA		
C _k -	400-630kVA				
B _k +	1000kVA		EU beste nivå		
A _k + +					

2.3 Råvarer

Transformatorprisene er meget avhengig av råvarepriser. De viktigste materialene som brukes i produksjon av transformatorer er: kobber, aluminium, kjerneblikk (Grain Oriented-GO), olje, isolasjon, kald- og varmvalset stål. Produksjonskapasiteten av amorf kjerneblikk (AK) er meget begrenset som kjerne-råstoff. Det er ingen produsent av AK i Europa.

Verdensomspennende produksjon av raffinert kobber er 18500kT per år og EU bruker 5000kT hvert år. Omtrent 3% av kobberproduktene brukes i produksjon av transformatorer. Kobberretterspørselen er fortsatt økende og akselererende på verdensbasis. 34% av kobber på verdensbasis kommer fra gjenvinning.

Fra 2004 til 2008 vokste kjerneblikkmarkedet kraftig fra 1500kT/år til 2200kT/år (Kina og India). Kapasiteten til de globale produsenter ble fullt utnyttet. I 2009, da etterspørselen falt (økonomisk og finansiell krise), ble GO kapasiteter ytterligere økt i hovedsak i Kina til 2500kT/år. Den globale forsyning av GO med høy permeabilitet (HGO) og bedre energieffektivitet i 2009 var på nesten 700kT/år,

derav 130kT/år i EU. Global GO etterspørsel er ventet å vokse til omtrent 2700kT/år i 2015, derav 1000kT/år for HGO. I EU er forventet etterspørsel moderat, med sterkere fokus på HGO.

Eneste produsent av AK i 2007 var Hitachi-Metglas, med kapasitet på 50kT/år. I tillegg er det en rekke mindre kinesiske selskaper som kan produsere begrenset mengde amorfe blikk som totalt gir mindre enn 150kT/år produksjon. Markedsandelen av AK på det globale markedet av kjernematerialer (=GO+AK) er på 2,5%! Antall installerte amorfe transformatorer er anslått til 1500000 (mest i USA, Japan, India og Kina). Bare noen få hundre er i europeiske nett.

2.4 Totale eierkostnader (Total Cost of Ownership-TCO)

Resultatet av anskaffelsesprosessen, skal være transformator med lavest TCO, og tar hensyn til tapene og er optimalisert for en gitt applikasjon. TCO av transformatorer defineres slik:

$$TCO=PP+A*P_0+B*P_k$$

PP er kjøpesummen (Purchase Price), P_0 og P_k er tapene (W),

A er tomgangstaps kostnader per W, $A = \frac{(1+i)^n-1}{i*(1+i)^n} * C_{kWh} * 8760$

B er belastningstaps kostnader per W, $B = A * \left(\frac{I_l}{I_r}\right)^2$

i er renten (%/år), n er antatt levetid (år) av transformator,

C_{kWh} er prisen på energi (€/kWh), 8760 er antall timer i et år,

I_l er belastningsstrøm (A) og I_r er merkestrøm (A)

2.5 Vurdering av livsløpskostnader (Life Cost Assessment (LCA))

Det ble utført en LCA-analyse som dekket: produksjonsfase, transport-fasen, bruks-fasen og end-of-life fase. For å gjøre LCA analysen enklere, ble transformatorer delt i basistilfeller som representerer store grupper av transformatorer på EU-markedet (tabell 2).

Tabell 2: Basis tilfeller av transformatorer

	Transformator type	Gjennomsn. merkeytelse (kVA)	Typisk tomgangstap (W)	Typisk belastningstap (W)
BC-1	Olje fordelingstransformatorer	400	750 (D ₀)	4600 (C _k)
BC-2	Olje-industri	1000	1700 (E ₀)	10500 (C _k)
BC-3	Tørre-industri	1250	2800	13100
BC-4	Krafttransformatorer	100000	40500	326000
BC-5	Olje DER	2000	3100 (E ₀)	21000 (C _k)
BC-6	Tørre DER	2000	4000	18000
BC-7	Isolerende transformatorer	16	110	750

Konklusjonen til studien var at miljøpåvirkningene på grunn av råvareutvinning, produksjon og transport er ubetydelig i forhold til energitapene ved bruk av transformatorer. Råvareuttak miljøpåvirkning er balansert med det høye gjenvinningsnivå (ca. 99%). Totale årlige kostnader i EU-27 i 2005 er vist i tabell 3. Totale kostnader knyttet til PT (BC-4) er høyest med mer enn 50% av de totale årlige kostnader. Deretter følger kostnadene forårsaket av DT (BC-1 med rundt 23%).

Tabell 3: Totale årlige kostnader i EU-27 i 2005

	BC-1	BC-2	BC-3	BC-4	BC-5	BC-6	BC-7	Total
EU-27 salg (enheter)	140400	43200	8047	3046	580	2320	75000	272593
Del av EU-27 salg	51,5%	15,8%	3,0%	1,1%	0,2%	0,9%	27,5%	100%
Prisen på produktene (mln €)	860	472	131	2302	11	65	101	3942
Energitap (mln €)	1385	1068	338	2606	71	300	30	5798
Totalt (mln €)	2244	1540	470	4909	81	365	131	9740

2.6 Forbedring, alternativer (muligheter)

Mulige forbedringsalternativer skal være sterkt fokusert på teknologier som kan redusere energitapene, samt alternative materialer som kan redusere miljøpåvirkningene i følge studien [2].

Første gruppe av forbedringsmuligheter er knyttet til „Best Available Technology” (BAT). "Best" betyr mest effektive for å oppnå et høyt nivå av miljøprestasjon for produktet og "Available" betyr at

teknologien allerede er utviklet til et akseptert og mulig teknisk nivå. BAT indikerer mål på kort-til mellomlang sikt, som ville være å fremme følgende tiltak:

- Bruk av kobber istedenfor aluminium-ledere;
- Bruk av sirkulært kjerne tverrsnitt;
- Bruk av høy permeabilitet kjerneblikk (HGO) med lavere tap;
- Bruk av amorfe kjerneblikk med lavere tap (dette er dessverre ikke mulig for større PT);
- Bruk av transformatorer med silikonolje, syntetiske estere eller biologisk nedbrytbare naturlige estere istedenfor tørre cast-resin transformatorer eller mineralolje;
- Øke tverrsnittet av ledere og kjernen for å redusere tap;
- Bruk „step-lap” konstruksjonsteknikk og ulike kjerneformer;
- Forbedre belegg mellom lagene av GOES og redusere støy;
- Redusere overføringstap i fordelingskablene med økning av spenning (fra 11kV til 22kV).

Alle forbedringsmuligheter øker produktets pris! Flere forbedringsmuligheter øker produktdimensjoner, volum og vekt!

Andre gruppe av forbedringsmuligheter er kalt „Best Not yet Available Technology” (BNAT) indikerer langsiktige muligheter:

- Videre forbedringer av GOES og amorfe materialer; GOES FoU søk etter enda bedre GO produkter med lavere tap og reduksjon av produksjonskostnader for råvarer, samt kjerner innenfor fabrikasjon. Amorf FoU fortsetter til metningsgrense på induksjons-nivåer nær de typiske for GOES med lavere innkjøpspris i fremtiden. Dette ville tillate mer kompakte kjerner og mindre-lettere transformatorer enn dagens amorfe design. Forbedring for å redusere støynivået er nødvendig.
- Bruk av superledende teknologi; Kobber og aluminium i viklingene erstattes med superledere og kjøling realisert med flytende nitrogen. Det er ikke forventet at DT er i produksjon før 2050.
- Bruke av „smart grid” teknologi for å slå av en by-pass transformatorer ved topplast; Redusere tapene ved utkobling (aktiv switching). Dette bør implementeres på systemnivå og ikke på produktnivå (transformator).

3. KONSULTASJONSFORUM OG ARBEIDSDOKUMENTER

Etter utstedelse av den forberedende studie og sluttrapport har EU-kommisjonen organisert fem møter i Teknisk Gruppe samt økodesign konsultasjonsforum med brukere, selskaper, produsenter og andre interessenter. Fire arbeidsdokumenter vedrørende økodesignforskriften med hensyn til små, medium og store PT er utstedt [4]. Totalt tap for alle transformatorer i EU-27 i 2008 var mer presist anslått til 93,4TWh per år. Mulig forbedringspotensial ved mer effektiv design er anslått til 16.2TWh per år i 2025, noe som tilsvarer 3.7Mt av CO₂-utslipp. Nødvendigheten av å øke markedspenetrasjon for teknologier og designalternativer for forbedring av energiytelsen, ble sterkt påpekt mange ganger.

4. ETABLERTE ØKODESIGNKRAV [4]

Europeiske Kommisjonen har helt fra starten av ønsket å begrense tapsverdiene i DT direkte, med utgangspunkt i eksisterende CENELEC normer og tapklasser. Disse CENELEC normer har 4 tapklasser for belastningstap A_k , B_k , C_k og D_k og 5 tapklasser for tomgangstap A_0 , B_0 , C_0 , D_0 og E_0 . Klasse A er laveste tap.

Nylig utkast FprEN 50588-1 av reviderte og samlede normer er publisert. Den inneholder to nye ekstra lave tomgangstapkolonner $AA_0=A_0-10\%$ og $AAA_0=A_0/2$. Kolonner B_0, C_0, D_0 og E_0 med høyest tomgangstap er fjernet. Dessverre øker lydeffektnivået for kolonne AAA_0 (amorf). Belastningstap kolonne D_k er fjernet. Utvalg av merkeytelser er utvidet og nå er det fra 25kVA opp til 3,15MVA (se tabell 4). Nye forslag til tillatte toleranser på tapene er 5%.

På den andre side, PT er meget spesielle produkter. PT er designet i samsvar med spesial kundens spesifikasjoner basert på IEC-normer med informasjon og garantier på ytelsen, herunder P_0 og P_k nivåer i stor grad bestemt av TCO analyse ofte bestemt av offentlige anskaffelsesprosesser. Mulige økodesignkrav var: å begrense nivåene av tapene, å foreskrive minimal akseptabel virkningsgrad, eller bare kreve produktopplysninger som minimumskrav. Begrensning av tapene kan føre til enda større problemer med dimensjoner og transport av PT; det gir ikke fleksibilitet, hvilket er nødvendig for ulike driftsmoduser. Slik produktinformasjon som minstekrav er ikke

nok ambisiøs. CENELEC teknisk kommisjon TC 14 har definert minimum Peak Efficiency Index (PEI), en parameter som tilsvarer en belastningsfaktor med likestilling av P_0 og P_k verdier eller maksimal effektivitet. Nytt utkast av FprEN 50629, Energieffektivitet av transformatorer med $U_m \geq 36\text{kV}$ er publisert. PEI har fordelen at den er basert på målbare verdier, enkelt og lett å bruke, uavhengig av teknologi, men representerer reelle fysiske fenomener kompatibel med taps-kapitalisering TCO. Det er også vanskelig å lage en PT med dårlig kjerneblikk til oppfylle minimum PEI kravet.

Innstilling av minstekrav for PEI for 25% av de minst effektive transformatorene, har blitt valgt som rimelige kriterier. Minimal PEI gjelder som økodesignkravet for medium-PT med merkeytelse over 3150kVA og for store PT fra 4MVA ($U_m > 36\text{kV}$). PEI definisjon kommer fra transformatorens energieffektivitet beregnet som følger:

$$\eta = \frac{k \cdot S_r - (P_0 + P_{c0}) - k^2 \cdot P_k}{k \cdot S_r}, \text{ effektivitet er maksimal ved belastningsfaktor}$$

$$k = \sqrt{\frac{(P_0 + P_{c0})}{P_k}}. \text{ Endelig ligning for PEI er:}$$

$$PEI = \eta_{max} = 1 - \frac{2 \cdot (P_0 + P_{c0})}{S_r \cdot \sqrt{\frac{(P_0 + P_{c0})}{P_k}}}$$

P_{c0} er elektriske effekten som kreves av kjølesystemet for tomgang.

Fra 1. juli 2015 skal følgende produktkrav gjelde:

- Informasjon om S_r , P_k og P_0 og elektrisk effekt til alle kjølesystemene påkrevd for tomgang, skal inngå i relatert produktdokumentasjon, samt på merkeplate samme som verdien av PEI og elektrisk effekt når PEI skjer for medium-PT og store-PT; Informasjon om vekten av alle de viktigste komponentene av en transformator (inkludert viklingsmaterialer og kjernemateriale) skal inngå i produktdokumentasjon;
- Stolpe DT burde ha ISO forsiktighetsmarkering.

4.1 Revisjon av de etablerte økodesignkravene

Senest tre år etter ikrafttreddelsen av kravene til Trinn 1, skal Kommisjonen vurdere teknologisk fremgang og mulighet for ytterligere innstramning, Trinn 2.

Tabell 4: Økodesignkravene for fordelingstransformatorer $U_m \leq 24kV$

Merkeytelse (kVA)	Trinn 1 (fra 1 Juli 2015)		Trinn 2 (fra 1 Juli 2021)	
	Maksimalt P_k (W)	Maksimalt P_0 (W)	Maksimalt P_k (W)	Maksimalt P_0 (W)
≤ 25	C_k (900)	A_0 (70)	A_k (600)	$A_0-10\%$ (63)
50	C_k (1100)	A_0 (90)	A_k (750)	$A_0-10\%$ (81)
100	C_k (1750)	A_0 (145)	A_k (1250)	$A_0-10\%$ (130)
160	C_k (2350)	A_0 (210)	A_k (1700)	$A_0-10\%$ (189)
250	C_k (3250)	A_0 (300)	A_k (2350)	$A_0-10\%$ (270)
315	C_k (3900)	A_0 (360)	A_k (2800)	$A_0-10\%$ (324)
400	C_k (4600)	A_0 (430)	A_k (3250)	$A_0-10\%$ (387)
500	C_k (5500)	A_0 (510)	A_k (3900)	$A_0-10\%$ (459)
630	C_k (6500)	A_0 (600)	A_k (4600)	$A_0-10\%$ (540)
800	C_k (8400)	A_0 (650)	A_k (6000)	$A_0-10\%$ (585)
1000	C_k (10500)	A_0 (770)	A_k (7600)	$A_0-10\%$ (693)
1250	B_k (11000)	A_0 (950)	A_k (9500)	$A_0-10\%$ (855)
1600	B_k (14000)	A_0 (1200)	A_k (12000)	$A_0-10\%$ (1080)
2000	B_k (18000)	A_0 (1450)	A_k (15000)	$A_0-10\%$ (1305)
2500	B_k (22000)	A_0 (1750)	A_k (18500)	$A_0-10\%$ (1575)
3150	B_k (27500)	A_0 (2200)	A_k (23000)	$A_0-10\%$ (1980)

Tabell 5: Økodesignkravene for store krafttransformatorer

Merkeytelse (MVA)	Trinn 1 (fra 1 Juli 2015)	Trinn 2 (fra 1 Juli 2021)
	Minimum Peak Efficiency Index, PEI (%)	
≤ 4	99,465	99,532
5	99,483	99,548
6,3	99,510	99,571
8	99,535	99,593
10	99,560	99,615
12,5	99,588	99,640
16	99,615	99,663
20	99,639	99,684
25	99,657	99,700
31,5	99,671	99,712
40	99,684	99,724
50	99,696	99,734
63	99,709	99,745
80	99,723	99,758
≥ 100	99,737	99,770

5. UTFORDRINGER, HINDRINGER, KONSEKVENSER OG BEMERKNINGER

- Lavere kjernetap krever økt etterspørsel etter 0,18 og 0,23mm HGO. Er stålverkene i stand til å tilpasse seg til denne endringen i etterspørselen raskt nok? Den økte etterspørsel og mangel på

balanserte tilbud, kan føre til raskt økende priser. Amorf blikkproduksjon kan oppfylle 3% av transformator markedets behov som alternativet. Redusert tykkelse på materialet vil øke kjerneproduksjonskostnader;

- Reduserte tap betyr dyrere transformatorer. Nettselskapene og brukerne kan velge å holde de gamle transformatorer så lenge som mulig fordi nye er for dyrt til kjøpe. Det vil også redusere markedets størrelse;
- Økt dimensjoner av produkter vil kunne føre til enda større kostnader. Endring av eksisterende nettstasjoner til større nettstasjoner i stand til å akseptere transformator med samme merkeytelse, men med økte dimensjoner er bare et eksempel;
- Kobber markedspris vil kunne øke betydelig;
- Økt støynivå kommer med bruk av amorf kjerneblikk;
- Konsekvenser ved bruk av AK er rektangulære viklinger som i sin tur gir ubalanserte aksialkrefter;
- Mulig monopol på AK produksjon;
- EU medlemmer har ulike synspunkter og spådommer om fremtidig elektrisk energipris. Ulike renter og horisont, fører til stor forskjell mellom kapitaliseringsfaktorer A og B, verdier som brukes innen innkjøpsprosessen med TCO. Husk at den fremtidige økodesignforskriften skal bli brukt i alle land innen EU, uansett på hvilket nivå deres kapitalisering er. Politisk stridspunkt som ikke er lett å forene og standardisere?
- Hva bør man gjøre med langvarige innkjøpsavtaler med nivåer av tap over eller PEI under foreskrevne nivåer innen forskriften?

6. REFERANSER

- [1] Directive 2009/125/EC of the European Parliament, Oktober 2009
- [2] Final Report LOT2: Distribution and Power Transformers Task 1-7, VITO & Bio IS, Januar 2011
- [3] Strategies for development and diffusion of Energy Efficient Distribution transformer–SEEDT-Project report, July 2008
- [4] Commission Regulation (EU) No.../.. of XXX on implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament with regard to small, medium and large power transformers.