

Små Krafttransformatorer med reduserte kjernetap. Endringer i det europeiske transformatormarkedet.



Siv.ing. El.kraft Kårstein Longva
Produktsjef og Konstruksjonssjef for
Transformatorer Møre Trafo AS (fra 1983)
Medl. NK14 Transformatorer (fra 1989)

Økodesigndirektivet og nye EU-krav vil få store konsekvenser for produsenter og brukere av fordelingstransformatorer. Prisene vil stige betydelig og det kan bli mangel på materialer. Produsentene pålegges ved lov å benytte de mest kostbare materialene og prosessene. Målsettingen er lavest mulig totale tap i nettet. For norske produsenter vil det være en fordel at lavpristransformatorer med høye tap fjernes fra markedet, under forutsetning av at økt etterspørsel og økningen i pris på de beste kjernematerialene, holdes på et rimelig nivå. Aluminium har god tilgjengelighet. Det forventes kamp om kobberressursene som er begrenset. Historien gir indikasjoner på hvor potensialet vedrørende tapsreduksjon er størst.

Økodesign- og Energimerkedirektivet

Økodesigndirektivet 2009/125/EF fra oktober 2009 har som målsetting å fjerne de minst energieffektive produktene fra det europeiske markedet. NVE, Norges Vassdrags og Energidirektorat er fra norsk side driver av prosessene og har valgt å prioritere 14 energirelaterte produktområder. [1] På transformatorområdet vil fordelingstransformatorer bli mest påvirket av de nye kravene. Fordelingstransformatorer eller mer riktig **Små Krafttransformatorer** produseres i størrelser fra 25kVA opptil 3150kVA med merkespenning opptil 33kV (36kV systemspenning) og forbrukerspenning $\leq 1,1$ kV. Nedtransformering typisk for Norge er 22/0,415kV eller 22/0,24kV. Ved opptransformering benyttes gjerne 22/0,69kV eller 22/1,0kV evt. 22/6,6kV.

Et historisk tilbakeblikk sett fra en norsk produsent av fordelingstransformatorer.

Dersom man går vel 30 år tilbake, ble det i 1980 ved Møre Trafo kun brukt kobber som viklemateriale. Kjernematerialet var 117M2H30 (Max 1.17W/kg og tykkelse 0,3mm). Fra 1983 ble laserbehandlet blikk med 20 % lavere tap introdusert. Kvalitet 95M0H27(0,95W/kg og 0,27mm) ble på slutten av 80-tallet standarden for det nordiske markedet. Forholdet mellom kapitaliserte tomgangstap og belastningstap anbefalt av EFI/SINTEF var $P_o:P_k = 3:1$. ca $P_o=30$ kr/W og $P_k=9$ kr/W.

Finanskrisen i 1987-88 og et ønske om å tilpasse Norge til EU -landene, førte til nye verdier i 1988 på $P_o=22$ kr/W og $P_k=9$ kr/W. Da grep norske myndigheter inn og hevet kapitaliseringsverdiene for 1989 til $P_o= 38$ kr/W og $P_k=7,5$ kr/W. Dette var et klart signal om at man ønsket å beholde lave kjernetap i transformatorer for det norske markedet. Modellen for belastningstap ble endret idet forholdet $P_o:P_k$ ble endret til 5:1, se eget avsnitt nedenfor.

Sterkt prispress i det europeiske markedet førte til at flere fabrikker ble flyttet til lavkostland. Inntak av lavpristransformatorer i det Svenske markedet førte til prisnedgang også i Norge. Preferanse-

regelen eller 10 % regelen var i strid med Norges forpliktelser etter EFTA-konvensjonen og EU (EF) - direktiver. Energiloven av 29. juni 1990 åpnet for et fritt marked. Prisene på transformatorer i det norske markedet falt betydelig. Det var overproduksjon av transformatorer i Europa og flere fabrikker ble lagt ned i denne perioden. Også i de nordiske landene ble flere fabrikker stengt eller flyttet. Møre Trafo startet å legge ned tørrtransformatorproduksjonen i 1998. Det ble i stedet vedtatt å satse på anvendelse av miljøvennlige isolervæsker utviklet av Cooper Power (Cargill, USA) i 1997. Møre Trafo var i 2001 først i Europa med kommersiell anvendelse av FR3 Naturlig Esterolje basert på planteoljer. I transformatorer med FR3 Miljøolje har man en løsning med god miljøsikkerhet og god brannsikkerhet i kombinasjon med oljetransformatorens lave tap. [2] Tørre har høyere tap [3]

Hele perioden fra 1990 til 2005 ble preget av lave priser både på materialer og transformatorer. De som brukte kobber som viklemateriale måtte utvikle nye transformatorer med aluminium for å kunne konkurrere. I Norge, Sverige og Sveits har det likevel vært lønnsomt å bruke laserblikk med lave tap på grunn av relativt høye kapitaliseringsverdier. (I 2003 vurderte rett nok Møre Trafo å lage en lavprisvariant med M5 blikk 1,40W/kg for å kunne konkurrere i EU-land, med dette ble lagt på is.) Se tabell 2.

Valg av viklemateriale Kobber (Cu) eller Aluminium (Al)

Tapene i viklingene består av resistans-(DC)-tap og tilleggstag V_z . DC-tapene i Al er 1,6 x DC-tap i Cu. Imidlertid er tilleggstagene for V_z Al = 0,4 x V_z Cu. Dette er fordi virvelstrømstapene er omvendt proporsjonal med kvadratet av resistansen. ($1/[1,6 \times 1,6]$). Aluminium har flere tekniske og miljømessige fordeler som vekt og lokal produksjon av folieviklemateriale i Norge. [2], [3] Kjernens volum og vekt blir noe større med aluminium sammenlignet med kobber.

Materialprisstigning : I 2004 begynte materialprisene å stige på verdensbasis på grunn av stor utbygging blant annet i Østen. I 2005 gikk råvareprisene rett opp, og prisen på laser kjerneblikk økte med 300 %. På grunn av generell økning i kostnadsnivået økte kapitaliseringsverdiene i Norge i 2006 med 60-70 % til $P_o = 61$ kr/W og $P_k = 12$ kr/W.

På verdensbasis har man nå justert opp kapasiteten for konvensjonelt kjerneblikk, slik at prisene er noe redusert. Pristoppen i 2005 startet en prosess i å vurdere amorfe kjerneløsninger med meget lave kjernetap. Anvendelsen av amorfe kjerner er mindre i Europa enn i Asia av flere grunner. Transformatorer med amorfe kjerner har større dimensjoner og høyere akustisk støy, se nedenfor.

EU-landene og kjerneblikk

I hele 30-årsperioden har 80-90 % av forbruket av kjerneblikk i de største EU -landene vært med kvalitet 1.30W/kg eller 1.40W/kg. Det er 40-50 % høyere kjernetap enn det vi har benyttet i norske transformatorer. Innen EU var det spesielt på 80 og 90 -tallet stor fokus på tiltak for å sikre grunnvannet. Man var redd for at oljelekkasjer skulle forurense grunnvannet. Med dette som utgangspunkt, har dette ført til en større andel installasjoner med tørre epoxytransformatorer i EU. En tørr epoxytransformator vil på grunn av høyspenningsteknikk og kjøleteknikk måtte ha en større kjerne i vekt enn en tilsvarende oljetransformator. Typiske verdier for tørre transformatorer er 1,4-2,0 ganger høyere kjernetap og 1,3-1,5 ganger høyere belastningstag enn oljetransformatorer, sammenlignet med samme materialkvaliteter. [3]

Omstillingen blir størst for de store medlemslandene i EU. Hvorfor lovregulere tapene direkte?

Årsaken til at EU -landene helt fram til i dag har installert transformatorer med høye tap er at de har kapitalisert med kortere økonomisk levetid og derav med lavere kapitaliseringsverdier. Beskrivelsen ovenfor viser at potensialet for energisparing er stort. Dersom man velger å innføre lave tap kun på nye installasjoner, vil omstillingen gå for sakte. Det må stimuleres til utskifting av eksisterende transformatorer. EU har valgt å gå inn for direkte regulering av tapene for å unngå at mange tenker kortsiktig og ikke kapitaliserer tapene med i den totale prisen. En politisk oppjustering av kapitaliseringsverdiene i alle land i Europa ville kunne gi en god effekt, forutsatt lovpålagt kapitalisering. Fordelen med å gå rett på produsentene av transformatorer og regulere ned tapene, er at man samtidig legger press på de store produsentene av kjerneblikk. De nye direktivene vil gjøre det lønnsomt å utvikle nye og bedre kjerneblikk kvaliteter. Denne prosessen er allerede i gang.

Kapitalisering ved kjøp av transformator til industribedrifter.

Industrien i Europa og også i Norge, kjemper med «ryggen mot veggen» for å oppnå lønnsomhet. En industribedrift som skal betale en transformator selv og kanskje er truet med utflagging, vil helt klart velge en transformator med lav pris og dermed med høye tap dersom denne er tilgjengelig. Et høyere kostnadsnivå ved bygging og forbedring av elektriske anlegg vil være negativt for industrien.

Utbygging av fornybar kraft, vindkraftanlegg, transformator med høye tap ble valgt

Dette er et konkret eksempel fra 2009 ved utbygging av fornybar energi. For 10 vindturbiner ble det forespurt på 2500 kVA transformatorer. Kapitaliseringsverdien for kjernetap var oppgitt til $P_o=77 \text{ kr/W}$. Utbygger valgte å kjøpe 10 stk transformatorer med pris kr 200.000,- med tomgangstap $P_o=2900\text{W}$. Tilbudet fra Møre Trafo med $P_o=1800\text{W}$ med pris kr 285.000,- ble ikke valgt selv om den totale kapitaliserte pris var ganske lik. Differanse i tapskostnad : $1100 \text{ W} \times 77\text{kr/W} = \text{kr } 84.700,-$. Utbygger sparte $85.000 \times 10 = 850.000,-$ ved innkjøp av transformatorer, men man taper 11kW ($1100\text{W} \times 10$) kontinuerlig når transformatorene er satt spenning på, uavhengig av belastningen. Med det nye EU -direktivet i kraft ville utbygger bli presset til å velge det beste alternativet for fremtiden, lavpristransformatoren ville være ulovlig å produsere.

Hvordan kan EU lykkes mest mulig med å bremse tapsøkningen fra produksjon, distribusjon og forbruk av elektrisk energi?

Løsningen er etter vår mening er å sette kravene slik at det blir mer lønnsomt å utvikle og bruke bedre materialer og produkter, men at kravene ikke må settes for harde. Økt etterspørsel etter de beste materialene vil føre til prisstigning, det er det stor enighet om. Det er bekymring i bransjen for at prisene på transformatorer vil bli så høye at fornyingen, utskiftingen av gamle transformatorer med høye tap vil stoppe opp eller bremses for mye. Uavhengig av om man er netteier, entreprenør, montør eller produsent, er det en fordel at investeringstakten er noenlunde jevn. Det trengs veltrimmede organisasjoner og bedrifter med god tilgang på høy kompetanse og god kapasitet for å kunne gjennomføre omstillingsprosessene. Kompetanse er tidkrevende å bygge opp og vedlikeholde. En for sterk økning i prisen på energirelaterte produkter generelt vil kunne føre til stagnasjon i all type industri som samfunnsstrukturen er bygd opp rundt.

Tomgangstap, belastningstap, impedans og spenningsfall

Tomgangstapene er konstante ved påtrykt spenning og er uavhengige av belastningen.

Tomgangstapene er det samme som kjernetapene og refereres til merkespenning.

Belastningstapene er i hovedsak strømvarmetap i viklingene og disse refereres til merkestrøm.

Belastningstapene er proporsjonale med strømmen i kvadrat. Dersom belastningen er gjennomsnittlig 0,5 blir belastningstapene 0,25 eller 25% av belastningstapene ved merkestrøm. Dette viser at å overdimensjonere transformatoren i kVA fører til lave belastningstap og man er forberedt på økt belastning. En annen fordel ved å gå opp i størrelse på transformatoren, er at spenningsfallet blir lavere på grunn av lavere kortslutningsimpedans i ohm. (Forutsatt riktig ønsket kortslutningsnivå). Ulempen med å velge en større transformator enn behovet, er at kjernetapene blir høyere.

Optimalisering av Nettstasjoner og fordelingssystem

Strømforbruket har økt betydelig. Det samme gjelder kravene til kvalitet på strøm og spenning. I de største byene er areal til tekniske anlegg en begrensende faktor. Det er rett og slett ikke plass til større transformatorer med større lengde og bredde. Spesielt i gamle bydeler kan transformatorrommet være vanskelig tilgjengelig for bytte til transformator med lavere tap og større ytelse. Nyere anlegg dimensjoneres gjerne for en framtidig høyere ytelse og transformatorrommet er plassert med dør mot yttervegg slik at transformatoren lettere kan skiftes. Man setter inn en mindre transformator og bytter til en større når behovet melder seg. En transformator med FR3-olje vil utsette behovet for skifte av transformator fordi den kan overbelastes kontinuerlig med 15%. (dette gjelder ikke dersom skiltet allerede er stemplet med Temp.kl B dTo75 og dTv80). En annen løsning som reduserer kjernetapene, er å installere 2 like transformatorer, men at bare den ene er satt spenning på. Denne løsningen gir flere driftsmuligheter. Man kan øke ytelsen ved å drifte begge separat eller i parallell. Vedlikehold kan utføres spenningsløst.

Fra Anbefaling og Harmonisering til krav styrt av Lover og Forskrifter og Normer

IEC60076 er en serie normer som styrer den tekniske kvaliteten, rutinetester og spesielle tester for krafttransformatorer. De nye forslagene fra EU berører de internasjonale normene i mindre grad. Unntaket er forslag til strengere toleranser på tap. Tapsklasser for europeiske transformatorer var en del av såkalte harmoniseringsdokumenter med målsetting om standardisering over landegrensene. HD428 for oljetransformatorer utarbeidet av CENELEC ble senere til EN 50464. Denne europasnormen har 4 tapsklasser for belastningstap Ak, Bk, Ck og Dk og 5 tapsklasser for tomgangstap Ao, Bo, Co, Do og Eo. Klasse A er laveste tap. I tabell for tomgangstap er også maksimal lydeffektnivå i dB(A) oppgitt. EU foreslår å fjerne Dk (høyeste belastningstap) og alle klasser for tomgangstap høyere enn Ao. I tillegg har man opprettet AAo og AAAo=Ao/2. Ao/2 er i prinsippet amorf kjerne. AAo har vært gjennom en pruteprosess og man har foreløpig landet på Ao-10 %. Samtidig med dette arbeidet har en arbeidsgruppe CLC/TC 14, normkomiteen for transformatorer, utarbeidet et forslag til erstatning av EN 50464. Den har fått betegnelsen prEN 50588-1 og skal opp til avstemming i NK14 i april 2014.

Økodesigndirektivet planlegges pr. dags dato gjennomført i 2 trinn, juli 2015 og juli 2021

Første trinn 2015 er foreslått AoCk opp t.o.m. 1000kVA og AoBk fra 1250 til 3150 kVA. Toleransene på tap er foreslått endret fra 10(15)% til maksimalt 5 %. Etter 3 år i 2018 vil man vurdere tilgjengeligheten på materialer, og om man skal innføre kravene for 2021 som er Ao-10 % og Ak. Garanterte tap og tapsklasser skal nå også angis på skiltet til transformatoren. Testprotokoll/ dokumentasjon utvides slik at den også inneholder vektorer av hovedkomponenter inkludert typen av viklemateriale og kjernemateriale. En del produsenter leverer denne dokumentasjon på forespørsel,

men nå blir det et krav. Hensikten er blant annet å gjøre gjenvinning, resirkulering lettere. Man får bedre kontroll med verdien av vikle-materialet ved gjenvinning etter endt levetid. Råvarepris pr.kg for kobber, Cu er 3,5 ganger høyere enn for aluminium, Al. [3] og Tabell 1.

MØRE TRAFØ AS HOVEDKONTOR N-6230 SYKKLVEN TLF.: 47-70 24 61 00		GJENVINNING Materialer 98,3 % Vekt	
23-okt-01 2001			
Materialer		GJENVINNING	
VEKTFORDELING 1 %		Hermetisk tett TRANSFORMATOR	
1600 kVA		Olje	
LH1600D4		OTK 8578	
Type :	Laser	Kjerneblikk	1 392,0 39,3 39,3
M90-27P	Al	Viklinger LS	142,3 4,0
Aluminium	Al	Viklinger HS	294,9 8,3 12,3 51,58
	Al	Spoleuttak	15,7 0,4
	Al	Uttaksleder	7,6 0,2
Messing	Ms	Gjennomf. LS	63,2 1,8
Plug-in	EP	Gjennomf. HS	4,2 0,1 2,6 14,9
	Papir	Isolasjon	51,9 1,5 1,463
Stål	St.	Fotlabb	5,8 0,2
	St.	Bjelker/stag/bolter	73,0 2,1
	St.	Lokkplate	54,6 1,5
	St.	Eksp.tank	0,0
		Div.	4,0 0,1 3,9
		Kjerne & viki.	2 109,0 59,5
Lav	St.	Beholder	686,0 19,3 23,22
Mineral	M	Olje	707,0 19,9 19,94
		Vekt	3 502,0 98,8
	St.	Tralie	44,0 1,2 1,241
	St.	Kapsling	0,0 0
		Total	3 546,0 100,0 100,0
	St.	Kapsl.grad IP	0,0
	St.	Isol.kapsling	0 0,0



Tabell 1: Gjenvinning av materialer 98,3 %.

1600 kVA Transformator

Omlegging til bedre kvaliteter av kjerneblikk i Transformatorer (reduksjon av tap W/kg)

I Norge, Sverige, Sveits og Australia har man i 20-25 år hovedsakelig anvendt de beste kvalitetene av konvensjonelt kjerneblikk 0,27mm med laserbehandling [4]. Tynnere blikk 0,18mm og 0,23mm er til nå lite brukt i fordelingstransformatorer på grunn av høy produksjonskostnad av kjerner. I andre land, spesielt de store industrilandene i Europa, har man helt fram til i dag benyttet 0,30 mm blikk med opptil 40-50 % høyere tap W/kg. (sammenlignet med 0,27 laser).

Tomgangstapene består av hysterestap og virvelstrømstap. Virvelstrømstapene kan blant annet reduseres ved å benytte tynnere blikk. Ulempen er at fyllfaktoren blir dårligere og at produksjonskostnad både hos kjerneblikkprodusent og transformatorprodusent øker. $0,27/0,18=1,5$ det må klippes og pakkes 50 % flere blikk pr. kerne, ved omlegging fra 0,27 til 0,18mm blikk. En ny tykkelse, 0,20mm foreslås nå fra en leverandør for bedre optimalisering. Det har også foregått en kontinuerlig forbedring av kjerneblikkproduksjonen generelt. Beste 0,27mm kvalitet er nå 85M0H27, 0,85W/kg og beste 0,23mm er 75M0H23, 0,75W/kg.

En omlegging til 0,23 -blikk $0,27/0,23=1,17$, dvs. 17 % økning i produksjonskost er mer overkommelig. Trinn 1 : 2015 AoCk er da innen rekkevidde og det vil bety at prisen på transformatorer øker med 20-40 % avhengig av om man bruker viklinger av Al/Al eller Al/Cu.

Trinn 2: 2021 Ao-10 % Ak vil kreve viklinger av kobber Cu/Cu og/eller enda bedre blikk-kvaliteter, konvensjonelle 0,18mm (0,20)mm eller forbedring av 0,23mm tykkelsen. Ut fra dagens materialpriser anslås prisøkningen pr. transformator å bli 60-100 %. Trinn 2 kan også oppnås ved å benytte amorf kjerneproduksjon. Viklinger blir da Al/Cu eller Cu/Cu og prisøkningen 60-80 %.

Hva er best tilgjengelig teknologi ? Forventet utvikling

Amorfe kjerner og konvensjonelle kjerner har ulik konstruksjon og egenskaper. Det amorfe blikket er 0,025mm i tykkelse og fyllfaktoren bare 80 % . Konvensjonelle kjerner har fyllfaktor 97 %.

Amorf metningsgrense er 1,6 Tesla (typisk induksjon 1,2-1,4T), konvensjonell metningsgrense 2,0 Tesla (Typisk induksjon1,6- 1,8T). Dette fører til at amorfe transformatorer blir større i volum og vekt enn de konvensjonelle. På grunn av større kjerne, blir belastningstapene høyere med amorfe kjerner. Fordelen er meget lave tomgangstap Ao/2.

Amorfe transformatorer er allerede installert, men med blandet mottagelse i det europeiske markedet. Årsaken er høyt støynivå, og store mål L x B, lengde x bredde. Nettselskapenes hverdag er økt strømforbruk og økt toppbelastning og ofte manglende kjøling. Det behovet tilsier et ønske om økt kVA i transformatorrommet, lavere tomgangstap og belastningstap uten økning i L x B.

Eksempel på kundekrav for 800 kVA transformator, Maksimale ytre mål L x B

Kravet er ganske likt i de nordiske byene L x B = 1600 x 900mm. Dersom denne 800 kVA transformatoren må byttes kan man få inn en 1250kVA med konvensjonell kjerne. Med amorf kjerne vil man få problem med å få inn en 315 kVA. Se tabell 2 utvikling av 800 kVA Oljetransformatorer.

	År	Vekt kg	L	B	H	Po	W/kg	mm	Pk		Klasse
OTD8760	1980	3010	1735	905	1950	1100	1,17	0,30	5670	Cu/Cu	DoAk
Kundekrav			1600	900							
OTK7560	1995	2460	1740	890	1625	800	0,95	0,27	6820	Cu/Al	BoBk
OTW6960	2001	2260	1500	900	1490	840	0,95	0,27	6490	Al/Al	CoBk
OTE6760	2003	2080	1480	890	1490	930	0,95	0,27	7500	Al/Al	CoCk
OTE6760 M5	2003	2080	1480	890	1490	1350	1,40	0,30	7500	Al/Al	EoCk
OTE6760	2003	2570	1500	900	1490	650	0,90	0,27	6900	Cu/Cu	AoBk
OTW51160F	2005	2100	1280	830	1460	850	0,90	0,27	9560	Cu/Al HT	CoDk
Amorf 1	2012	3708	1610	1080	1610	340	0,30	0,025	7500	Al/Al	Ao/2 Ck
Amorf 2	2012	4005	1610	950	1490	300	0,30	0,025	6420	Cu/Al	Ao/2 Bk
Amorf 3	2012	3515	1950	1100	1600	350	0,30	0,025	7000	Al/Al	Ao/2 Bk
OTW51170	2013	2390	1280	830	1710	880	0,90	0,27	6040	Cu/Al	BoAk
OTW51170B	2013	2390	1280	830	1710	880	0,90	0,27	8520	Al/Al	BoCk
OTW6960	2015	2258	1500	900	1490	650	0,75	0,23	7350	Al/Al	AoCk
OTW6970	2021	3260	1480	900	1590	580	0,75	0,23	5880	Cu/Cu	Ao-10 % Ak

Tabell 2 : Tapsfaktor W/kg er angitt ved 1,7 Tesla for konvensjonelt blikk, amorft blikk ved 1,3 Tesla.

Konklusjon

EU-direktivene er et nødvendig og positivt tiltak, men kravene må ikke settes for harde. EU's opprinnelige forslag vedr. tap var toleranse 0 % ☺. Som et eksempel kan toleransen på kjerneblikktykkelsen nevnes; EN 10107:2005 Section 7.2.1 For 0,23 og 0.27 mm tykkelse → Toleranser: - 0.015 / + 0.005 mm. Stålverkene må øke kapasiteten og bruke mer energi på å valse ned en større andel til tynnere blikktykkelser med bedre utgangsmateriale. Amorf produksjonskapasitet er liten i dag. Størrelsen på nettstasjoner for nye anlegg må øke i størrelse og volum dersom den amorfe teknologien skal vinne fram.

[1] Økodesign/Energimerking, Eu-direktiver og NVE Lover og forskrifter på høring 2009-2013. NVE

[2] Miljøvennlige Fordelingstransformatorer- Forbedret Sikkerhet og pålitelighet. 2005 K.Longva

[3] Oljeisolerte Transformatorer eller Tørrisolerte Epoxy Transformatorer. Hvilken fordelings-transformator bør man velge ut fra energisparing, driftssikkerhet og miljøbelastning? 2011 K.Longva

[4] Tabell 1: Gjenvinning av materialer, vektfordeling. Møre Trafo AS. 2001

[5] Tabell 2: Utvikling av 800 kVA oljetransformatorer Møre Trafo og Amorf 1,2 og 3