

Fordelingstransformatorer og levetid

Fagmiljøet i norsk energiforsyning har hatt en driftsfilosofi preget av langsiktig tenking . Dette har dannet grunnlaget for gode driftserfaringer. Nå brukes erfaringer med lang teknisk levetid for blant annet fordelingstransformatorer som begrunnelse for mulig høyere belastning. Dette gjøres ut fra ønsket om lavere kostnader og høyere inntjening.

av Kårstein Longva, Møre Trafo AS

Årsaken til 30-50 års levetid har vært lav gjennomsnittsbelastning på 40-70%, kombinert med lave omgivelsestemperaturer. Beregninger og testing viser at dersom gjennomsnittsbelastningen ligger like under merkelast for den enkelte transformatoren, vil kravet om en generell levetid på 30 år kunne oppfylles. Dersom belastningen økes til å ligge over merkelast, vil levetiden kunne falle dramatisk. Ved en konstant temperatur i varmeste punkt på 104°C ,vil levetiden kunne settes til 7år.

Temperatur og aldring

Tabellene i denne artikkelen angir temperaturer i transformatorer under forskjellige driftssituasjoner. Tabell nr. 1 viser data fra ny modell med hermetisk beholder. Isolasjonssystemet er ikke i kontakt med luft og elastiske kjøleribber tar av for oljens utvidelse når temperaturen stiger. Driftstrykket er meget lavt, fra 0,05 bar til 0,2 bar, og trykket er lavest i de største transformatorene p.g.a. liten oljemengde i forhold til størrelsen på kjøleribbene. Forserte levetidstester er utført med antall trykksvingninger tilsvarende 30 års levetid.

Tabell nr. 2 viser data fra eldre modell med ekspansjonstank. Denne modellen har høyere tomgangstap og lavere belastningstap sammenlignet med den nye modellen fordi prissettingen av tap er endret. Forholdet mellom pris på tomgangstap og pris på belastningstap var i 1984 2,6. I dag er dette forholdet differensiert, 4,1 for små transformatorer og 4,8 for transformatorer større enn 315kVA . Begge tabellene viser at overbelastningsevnen er høyest for de minste transformatorene.

Aldring av isolasjonen

Termisk levetid og aldringen av isolasjonen er bestemt av gjennomsnittstemperaturen i det varmeste punktet, også kalt "Hot- spot". Levetiden for papirisolasjonen defineres ut fra en reduksjon i mekaniske fasthetsegenskaper til 50% ut fra en målt startverdi. Nedbrytingen av materialet er sterkt temperaturavhengig og akselerer ved tilstedeværelse av luft og fuktighet.

Levetiden for det aktuelle materialet finnes ved enten å måle endring i bruddstyrke ved en gitt temperatur, eller ved å måle endringen i lengden til cellulosefibrene. Aldringen fører til kortere fibre og en DP -analyse, Degree of polymerisation, måler midlere lengde på cellulosemolekylene.

En transformator behøver ikke havarere selv om 50% av bruddstyrken til papiret er nådd . Havari er avhengig av de mekaniske påkjenningene transformatoren utsettes for, eksempelvis kortslutninger på linje eller kabel. Når fiberlengden avtar, vil papiret bli sprøere . Temperatursvingninger med påfølgende utvidelse og sammentrekninger av viklematerialet kan derfor føre til at papiret sprekker. Dersom en transformator er godt beskyttet mot overspenninger og det er liten sannsynlighet for store mekaniske påkjenninger, kan levetiden bli lengre enn det som beregnes termisk. Når de mekaniske fasthetsegenskapene til papiret er

kommet ned mot 20-25% av startverdien, vil det være så sprøtt at det kan gå i oppløsning under normale påkjenninger.

Toppoljetemperaturer

En transformator produsert etter IEC norm 60076 kan ha en maksimum toppoljeovertemperatur på 60°C ved merkelast, ut fra reelt forekommende omgivelse på maksimum 40°C. Ved å legge til normal omgivelsetemperatur på 20°C, får man en absolutt oljetemperatur på 80°C. Maksimumsverdien av absolutt toppoljetemperatur skal holdes under 100°C. Dersom man bevisst aksepterer en reduksjon av den normale levetiden, kan den økes til 115°C. I IEC-normene stilles det krav til at viklingsovertemperaturene ikke må overskride 65°C. Temperaturen skal måles som et gjennomsnitt av hver vikling, og målingen gjøres med resistansmetoden under varmeproeve etter IEC60076-2. Se tabell 1.

Tabell 1 viser data fra ny modell med hermetisk beholder.

Denne er produsert fra 1993 med aluminiums-viklinger fra og med 500kVA og større. 31,5kVA opp t.o.m. 315 kVA har kobbeviklinger.

Tabell 1:

YTELSE kVA ONAN	TYPE 1993 -->	Overtemperaturer °C		Hot-spot 2) overtemp. °C	Gj.snitt Absolutt temp.		Hot-spot V/ merke- last	Hot-spot V/toppolje 90	Hot-spot V/toppolje 115
		Topp-olje °C	Vikling Høyeste 1)		Topp-olje °C	Vikling Høyeste 1)			
31,5	OTKH2528	37	50	63	57	70	83	116	141
50	OTKH3525	39	57	70	59	77	90	121	146
100	OTKH3538	53	64	77	73	84	97	114	139
200	OTKH5538	40	58	71	60	78	91	121	146
315	OTKH5550	46	59	72	66	79	92	116	141
500	OTKH6560	45	55	68	65	75	88	113	138
630	OTKH6570	46	58	71	66	78	91	115	140
800	OTKH7560	48	61	74	68	81	94	116	141
1000	OTKH7570	49	58	71	69	78	91	112	137
1250	OTKH8570	53	61	74	73	81	94	111	136
1600	OTKH8578	55	59	72	75	79	92	107	132
2000	OTKH9578	60	63	76	80	83	96	106	131

Verdiene i tabellen er målt ved merkeverdier og standard spenninger.

For absolutte temperaturer er det brukt 20°C omgivelsetemperatur.

1) Med vikling "Høyeste", menes den av viklingene, høyspent eller lavspent, som har målt høyest temperatur.

2) Den avgjørende faktoren for termisk levetid på isolasjonen, er varmeste sted i viklingene. I en 3-fase-transformator vil dette være i øvre halvdel av midterste fase. Det er lagt til 13°C for å anslå disse temperaturene. Normal temperatur i varmeste punkt ved 20°C omgivelse og merkelast blir da maksimum 98°C.

Viklinger og kjølekanaler

Tillegget på 13°C fra gjennomsnitt til varmeste punkt er angitt som en erfaringsverdi i IEC60354. I realiteten vil temperaturfordelingen i hver vikling være avhengig av viklings-typen og materialet. Folievikling, trådvikling, lagvikling og skivevikling har forskjellig geometri som gir seg utslag i forskjellig overflate i direkte kontakt med sirkulerende olje. Antall lag og mengden isolasjon vil sammen med kjølekanalene være avgjørende.

Dersom transformatoren er konstruert med et minimum av kjølekanaler, vil det bli en stor differanse mellom viklingstemperaturen og toppoljetemperaturen. Dette ser man tydelig i tabell 1 ved for eksempel å studere 50kVA hvor differansen er 18°C. Ved 2000kVA er

differansen bare 3°C . I de største transformatorene er det lønnsomt med ekstra kjølekanaler med retningsstyring av oljestrømmen.

Det er viklingsovertemperaturen som er dimensjonerende for den enkelte transformatoren. Det bør man være oppmerksom på når det søkes å kontrollere temperaturen i varmeste punkt ved å måle toppoljetemperaturen. I tabell 1 og 2 er det vist hvilke "Hot-spot"- temperaturer man vil ha ved målte toppoljetemperaturer på henholdsvis 90°C og 115°C. Dette er absolutte temperaturer som vil være uavhengig av om de oppnås ved høyere omgivelsetemperatur, høyere last eller begge deler.

Tabell 2 . viser data fra eldre modell med ekspansjonstank. Denne er produsert fra 1980 til 1996 med kobbeviklinger.

Tabell 2:

YTELSE kVA ONAN	TYPE 1980--> -->1996	Overtemperaturer °C			Gj.snitt Absolutt temp.		Hot-spot V/ merke- last	Hot-spot V/toppolje 90	Hot-spot V/toppolje 115
		Topp-olje °C	Vikling Høyeste 1)	Hot-spot °C	Topp-olje °C	Vikling Høyeste 1)			
31,5	OTD2325	26	39	52	46	59	72	116	141
50	OTD3325	35	53	66	55	73	86	121	146
100	OTD4330	47	56	69	67	76	89	112	137
200	OTD5435	47	64	77	67	84	97	120	145
315	OTD6540	48	65	78	68	85	98	120	145
500	OTD7450	54	65	78	74	85	98	114	139
630	OTD7460	57	64	77	77	84	97	110	135
800	OTD8760	55	64	77	75	84	97	112	137
1000	OTD8770	57	65	78	77	85	98	111	136
1250	OTD9475	57	65	78	77	85	98	111	136

Verdiene i tabell 2 er målt ved merkeverdier og standard spenninger. For absolutte temperaturer er det brukt en omgivelsestemperatur på 20°C. Ved en temperatur i varmeste punkt på rundt 140°C vil nedbrytingen av isolasjonen akselere. Ved denne temperaturen vil det også kunne dannes gasser som øker sannsynligheten for havari fordi den dielektriske holdfastheten vil bli betydelig redusert. Papirisolasjonens og oljens tilstand vil kunne føre til at nedbrytingen akselerer ved en lavere temperatur. Luft via ekspansjonstank vil for eksempel føre til oksidering.

Oljens isolasjonsevne

Forutsetningen for levetidsberegningene i tabell 3 er at isolasjonssystemet er konstruert med spenningskontroll ved vanlig drift og ved overpenning. Dersom den elektriske feltstyrken blir for høy vil partielle utladninger kunne bryte ned oljen. Spenningsfordelingen i isolasjonssystemet er omvendt proporsjonal med dielektrisitetskonstantene $\epsilon = E$.

Ny olje har $E = 2,2$ og papir i olje har $E = 4,0 - 4,4$. Det betyr at elektrisk feltstyrke i oljen blir dobbelt så høy som i papiret. Oljen er det svakeste leddet i isolasjonsskjeden i forbindelse med dielektrisk nedbryting, men mineraloljene har blitt kvalitetsmessig bedre. Den elektriske holdfastheten til oljen skal måles etter IEC60156 med bestemt avstand og elektrodeform. Tynne skikt med olje tåler høyere kV/mm enn de tykkere, og det er avgjørende om det elektriske feltet er homogent eller inhomogent.

Oljen tilsettes inhibitorer for å hindre oksidering, men dette fører til at viskositeten blir dårligere. Derfor blir dette et kompromiss. Når temperaturen øker fra 25°C til 75°C bedres viskositeten for mineralolje 6 ganger. For silikonolje er forholdet tilsvarende 3 ganger. Silikonolje vil bli 4-5°C varmere enn mineralolje fylt på en transformator med samme tap. Silikonolje har bedre evne til å holde vann oppløst fordi mer vann kan trekkes ut av papirisolasjonen slik at aldringen forsinkes.

En stor del av installerte norske transformatorer har ekspansjonstank og oljen er her i kontakt med luft og fuktighet. Hermetiske transformatorer vil også med tiden få et vanninnhold selv om de er lukket. Det blir dannet vann ved aldringen av cellulose. Det anbefales likevel ikke å ta oljeprøver av **hermetiske fordelingstransformatorer**. Det vil øke sannsynligheten for å få luft inn i transformatoren og føre til driftsforstyrrelser avhengig av graden av montert overvåkningsutstyr. (Gassvakt/ Nivåvisning-el måling).

Målsettingen er et tilnærmet vedlikeholdsfritt og driftssikkert produkt.

Ved å benytte termisk oppgradert papir av cellulose eller aramidfiber kan levetiden for isolasjonen forlenges. Den negative innvirkningen som vann har på isolasjonen vil da reduseres.

Beregning av levetid

Levetiden bestemmes av gjennomsnittlig temperatur i varmeste punkt så fremt maksimumsverdien holdes under 140°C. Ved innstilling av maksimumsverdier for termometer må man ta hensyn til døgnvariasjoner. Vanlig innstilling for alarm er 90°C og for utkobling 105°C. Ved store døgnvariasjoner eller hvis tap av levetid er uvesentlig, kan alarm stilles på 100°C og utkobling stilles på 115°C.

Fra Montsingers regel og Arrhenius lov om kjemisk nedbryting, kan man utlede at reduksjon av temperaturen i det varmeste punktet med 6° C fordobler levetiden. Med et utgangspunkt i 7 års levetid ved 104°C får man da 14 års levetid ved 98°C, 28 år ved 92°C, 56 år ved 86°C og så videre.

Dersom en 2000 kVA har 100% belastning **konstant** vil levetiden teoretisk være 17 år. Ut fra tabellen ser man at "Hot-spot"-temperaturen ved merkelast er 96°C. Ved å senke gjennomsnittbelastningen til 90% synker "Hot-spot"-temperaturen til 84°C. Det betyr 12°C reduksjon, og fordobling av levetiden 2 ganger, dvs. 4 x 17 = 68 års levetid. Se formel nedenfor:

Dersom man går motsatt vei og belaster gjennomsnittlig 110%, vil "Hot-spot"-temperaturen øke til 107°C. Den teoretiske levetiden reduseres til 5 år.

$$\text{Relativ Aldringshastighet } V = \frac{\text{Aldringshastighet ved temp. } T_h}{\text{Aldringshastighet ved temp } 98^{\circ}\text{C}} = 2^{(T_h - 98) / 6}$$

$$\text{Levetid av papirisolasjon } \text{År} = \frac{14}{V} = \frac{14}{2^{(T_h - 98) / 6}}$$

Tabell 3: Forventet levetid som funksjon av temperatur i varmeste punkt.

Th	80	86	92	98	104	110	116	122	128	134	140
V	0,125	0,25	0,5	1,0	2	4	8	16	32	64	128
År	112	56	28	14	7	3,5	1,75	0,9	0,45	0,22	0,1

Aldringshastigheten kan holdes konstant lik 1,0 ved at gjennomsnittlig temperatur i det varmeste punktet per døgn holdes på 98°C, avhengig av belastningsfaktor og omgivelsetemperatur.

Tabell 4 : Belastningsfaktor som funksjon av omgivelsetemperatur ved konstant aldring.

Omgivelse temperatur	-25	-20	-10	0	10	20	30	40
Hot-spot overtemperatur	123	118	108	98	88	78	68	58
Hot-spot absolutt	98	98	98	98	98	98	98	98
Belastningsfaktor	1,37	1,33	1,25	1,17	1,09	1,00	0,91	0,81

Dersom driftsfilosofien endres til høyere belastningsgrad og høyere gjennomsnittlige temperaturer i varmeste punkt, vil økonomiske beregninger vedrørende livsløpskostnader måtte revurderes. Det anbefales derfor konsekvensanalyser på grunn av økt sannsynlighet for havari og følgeskader av dette.

Gjennomsnittstemperaturens betydning

En transformator som belastes høyt 24 timer i døgnet, må vurderes forskjellig fra en vanlig fordelingstransformator som har varierende last over døgnet . I IEC60354 defineres begrepet Normalt Varierende Overlast. Det betyr at høy temperatur i noen timer av døgnet oppheves av lavere temperatur i de resterende timer av døgnet. Overlasten er *Normalt Varierende* dersom transformatorens normale antatte levetid ikke reduseres.

Tabell 1 og 2 viser at små transformatorer som er godt beskyttet, kan ha høy belastning og lang levetid . På grunn av lave temperaturer i viklingene har driftserfaringene en naturlig forklaring . Driftserfaringer med små transformatorer kan ikke uten videre overføres til større transformatorer.

Teknisk levetid for transformatorer er avhengig av belastningsgrad og påkjenninger forårsaket av overspenning og overstrøm. Dette danner sammen med øvrige driftskostnader grunnlaget for beregning av livsløpskostnader. Etter endt livsløp er 98% av transformatorens vekt gjenvinnbar . Papirisolasjonen brytes ned termisk. De andre aktive delene som kobber, aluminium, blikk og stål kan resirkuleres på en enkel måte. Oljen kan gjenvinnes eller resirkuleres.

50 års erfaring med med utvikling, produksjon, distribusjon, drift og gjenvinning av transformatorer har dannet grunnlaget for kunnskapsbaserte beregning-systemer. Gjensidig utveksling av informasjon og systematisering for reduksjon av livsløpskostnader, har med dette gradvis **utvidet verdikjedebegrepet**.