

Miljøvennlige Fordelingstransformatorer

Forbedret Sikkerhet og Pålitelighet

Siv.ing. Elkraft ,Kårstein Longva
Møre Trafo AS N-6230 Sykkylven

Sammendrag

I denne artikkelen fokuseres det på teknologi og erfaringer i utviklingen av miljøvennlige hermetiske fordelingstransformatorer. Isolasjonssystemet i transformatorer kan forbedres sammenlignet med mineralolje, ved å benytte nye høyverdige isoleroljer som miljøoljen Envirotemp FR3. [1]

Oljeisolerte fordelingstransformatorer kan bygges med mye lavere tap enn luftisolerte tørre transformatorer.

Årsaken til dette er at olje er et bedre isolasjons- og kjøle-medium enn luft. I olje blir derfor både kjerne- og viklings-konstruksjonen mindre. Det betyr mindre material behov og lavere tap i oljetransformatorer.

Dette fremheves som viktig med hensyn på langsiktig planlegging av det globale miljø totalt sett. Ansvarlighet overfor miljøet bør også vises ved å benytte materialer som ikke er giftige og nedbrytbare, eller er mulig å gjenvinne på enkleste måte.

Envirotemp FR3 er en naturlig esterolje laget på basis av spiselige planteoljer. Oljen er 99% nedbrytbar i naturen. Cooper Power Systems utviklet FR3 i 1997. [1]

En FR3 transformator kan belastes 14% mer enn en mineraloljetransformator og spenningspåkjenningen blir 28% lavere med FR3-olje.



1. Introduksjon Møre Trafo

Møre Trafo AS ligger på Aursnes i Sykkylven, Sunnmøre, 30 km fra Ålesund. Møre Trafo har 120 ansatte og en årlig omsetning på

140 mill. NOK. Hovedproduktene er transformatorer og nettstasjoner. Ca 2000 oljeisolerte fordelings-transformatorer produseres pr. år fra råmaterialer ved anlegget i Sykkylven i størrelser fra 30 til 3150 kVA. Nettstasjoner leveres som utvendige eller innvendige betjente. Kunder er hovedsaklig nordiske nettselskaper, energiverk, entreprenører og industri.

Møre Trafo har markedsført miljøoljen FR3 i Norden siden tidlig i året 2000. Etter en større lansering på messen Eliaden 2004 har interessen for FR3-oljen økt betydelig.

Større nettselskaper som Hafslund Nett har i 2004 besluttet å erstatte silikonolje med FR3-olje i transformatorer i bygninger og nær bygninger.



Eliaden 2004, ved FR3 transformator fra venstre Nils Kjemphol og Kårstein Longva

2. Konstruksjon og Livssyklus-kostnader

Møre Trafo har siden 1990 utviklet kompakte miljøvennlige fordelingstransformatorer som er opptil 98% gjenvinnbare. Visjonen om å være ansvarlig overfor miljøet, har tatt bort det meste av plast og tre i transformator-konstruksjonen.

Papirisolasjonen, som utgjør 2 vektprosent, er fortsatt den beste høyspentisolasjon i kombinasjon med transformatorolje.

Etter 30 års levetid, kan materialene i en olje-transformator, lett bli gjenvunnet med lave kostnader. Kjernen er pakket med step-lap teknologi. Det gir lav støy og lave tap idet blikket også er laserbehandlet.

Det laserbehandlede kjerneblikket bidrar til en kosteffektiv kompakt konstruksjon fordi fyllfaktoren i pakkeprosessen er meget god, 0,97, og metningsgrensen ligger høyt på ca. 2.05 tesla.

Oval viklingskonstruksjon gjør at kjernen blir mindre og rektangulære tråder forbedrer fyllfaktoren slik at høyspenningsviklingene blir mindre. Viklingene kan være med kobber (Cu) eller aluminium (Al).

Aluminiumstråd og aluminiumsfolie leveres fra Hydro på Karmøy. I fremtiden vil det i det totale miljøregnskapet bli lagt mer vekt på å minimalisere transportveiene både for råmaterialer og ferdige produkter.

Selv om resistansen i Al er 60 % høyere sammenlignet med Cu, er Al med lav strømtetthet i mange tilfeller gunstigst å bruke. Spesielt gjelder dette i folieviklinger, fordi Al gir lave hvirvelstrømstap/tilleggstep.

Generelt er hvirvelstrømstapene (hv.s.) omvent proporsjonal med kvadratet av materialets resistans. D.v.s. $Al\ hv.s.tap = 0,4 \times Cu\ hv.s.tap$.

Hvirvelstrømstap i høyspentviklingene oppstår på grunn av strømmer og felt fra nabo tårn og lag. I folieviklinger oppstår avhengig av geometri ekstra hvirvelstrømstap i foliene på grunn av felt fra strømmen i uttaksskinnene.

Folie i lavspenningviklinger gir god kortslutningssikkerhet, god temperaturfordeling og kort vikletid.

Hermetisk tette oljetransformatorer med berøringssikre plug-in gjennomføringer er stort sett vedlikeholdsfrie og er spesielt holdbare selv i korrosive og tøffe atmosfærer. Hermetiske kompakte transformatorer med lite oljevolum utgjør med Envirotemp FR3 et langsiktig kosteffektivt valg.

Transformator beholderene er typeprøvet med sykliske trykk som simulerer 30 års levetid. Hver enkelt transformator lekkasjetestes. Typiske overtrykk er 0,2 bar for 30 kVA og 0,05 bar for 3150 kVA.

Utvidelseskoeffisientene for mineralolje og FR3 er tilnærmet like $0,75 \times 10^{-4} / \text{grad C}$.

For silikonolje er koeffisienten $1,04 \times 10^{-4} / \text{grad C}$ og trykket er erfaringsmessig 20-30 % høyere.

3. Aldring og Mekanisk Styrke

I en hermetisk tett transformator er FR3-oljen ikke i kontakt med oksygen. Levetiden til transformatoren er da bestemt av levetiden til papirisolasjonen. Aldringen av papiret akselerer med økende innhold av fuktighet, vanninnhold, og økende temperatur.

Selv i nye hermetiske transformatorer, som har gjennomgått en tørkeprosess vil de være igjen noe fuktighet i papiret, typisk mindre enn 1%. Det er en stor fordel at beholderen er hermetisk for å redusere mengden av vann i isolasjonssystemet.

Likevel vil mengden vann /fuktighet øke i løpet av transformatorens levetid, fordi vann er et spaltningsprodukt fra papirets aldringsprosess.

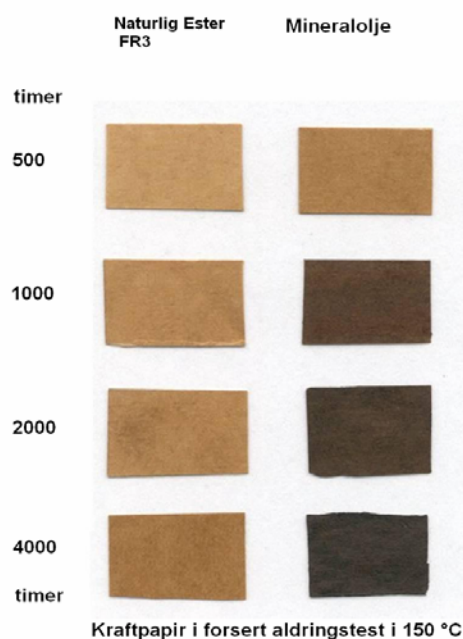
Når transformatoren varmes opp under drift, vil vannet som er i papiret bevege seg over i oljen i den grad oljen er i stand til å holde vann oppløst ved den aktuelle temperatur.

FR3 kan holde mye større mengde vann oppløst sammenlignet med mineralolje. Det er en av grunnene

til at levetiden for papir i FR3 økes 5-8 ganger sammenlignet med mineralolje. [2]

En forsert levetidstest i lukket prøverør ved 150 °C i 4000 timer viser at vanninnholdet i papiret øker fra 0,75% til 3,5% i mineralolje, og strekkfastheten til papiret reduseres til bare 10 % av den opprinnelige styrken.

Samme test utført med FR3 viser at papiret beholder 60% av sin styrke, (etter 4000 timer i 150 °C). Vanninnholdet i papiret minker fra startverdien som var ca 0,75% til 0,1%. FR3 tørker papiret og øker levetiden. Bilde 1 nedenfor viser resultatet fra testen [2].



Bilde 1. forsert aldringstest i lukket prøverør.

I mineralolje ser man fargeforskjell allerede etter 500 timer og etter 1000 timer er karbonisering startet. Strekkfastheten til papiret er redusert til 50% etter 500 timer i mineralolje.

Dersom strekkfastheten blir mindre enn 50%, kan kortslutningskrefter som oppstår ved feiltilstander i nettet, bli vanskelig å stå imot for transformatoren.

Når strekkfastheten til papiret kommer under 20% av opprinnelig styrke, vil papiret være så sprøtt at naturlige vibrasjoner og termisk utvidelse på grunn av vanlige lastforløp, vil kunne ødelegge transformatoren.

Prøver viser at en FR3 transformator kan belastes 14% mer enn en mineralolje transformator forutsatt samme transformator design og ønske om samme levetid. Det betyr i praksis at levetiden til transformatorer med FR3-olje ikke reduseres selv om gjennomsnittstemperaturen i toppoljen (termometerlomme) økes med 15-17 °K sammenlignet med mineralolje påfylt.



Bilde 2
PowerSafe [6] Fordelingstransformator med korte forbindelser innvendig og lave strømtettheter, sikrer god mekanisk styrke . Kortslutningstest utført etter IEC60076-5 førte til kun 0,45% endring av reaktansen.

4. Elektrisk Holdfasthet, Påkjenning og Pålitelighet

Dielektrisk holdfasthet i tørr og ren olje er ca. 60-70kV i både mineralolje og FR3. IEC 60296.

Når det gjelder holdfasthet, er FR3 mindre påvirket av vanninnhold sammenlignet med mineralolje. Mengden vann som kan holdes oppløst i oljen er avhengig av om det er ny olje og av temperatur i oljen.

Med 100ppm vann i mineralolje faller holdfastheten betydelig til 10-20 kV. FR3 vil ha en holdfasthet på 50kV selv med 400ppm vann oppløst.

Generelt for alle transformatoroljer er at holdfastheten faller betydelig med økende mengde støv og partikler i kombinasjon med vann i oljen. En ren produksjonsprosess og bruk av produksjonsmetoder som unngår løse cellulosefibrer, er viktig for å øke levetiden og påliteligheten til transformatoren.

Når det gjelder elektrisk feltpåkjenning i isolasjonssystemet, er oljen utsatt for den høyeste påkjenningen, samtidig som oljen har lavere holdfasthet enn papir både når det gjelder 50Hz og 1,2/50 impuls. Holdfastheten er avhengig av elektrodeform, oljeavstand, og grad av inhomogenitet. [3], [4]

Den elektriske feltpåkjenningen i isolasjonssystemet er omvendt proporsjonal med dielektrisitetskonstanten ϵ .
 ϵ mineralolje = 2,2, ϵ papir = 4,4 i mineralolje.

Dersom vi antar at feltpåkj. i papiret er 4 kV /mm , vil påkjenningen i mineraloljen bli

$$4 \text{ kV/mm} \times 4,4 / 2,2 = 8 \text{ kV/mm}$$

e FR3 = 3,2 og elektrisk feltfordeling blir som følger;

$$4 \text{ kV/mm} \times 4,6 / 3,2 = 5,75 \text{ kV/mm i FR3}$$

4,6 er ϵ papir i FR3.

Den elektriske feltpåkjenningen i FR3 er 28% lavere sammenlignet med mineralolje i samme viklingskonstruksjon.

| Dielektr. Konst. er | Isolasjons-medium | Felt-påkj. kV/mm | AC 50 Hz kV/mm | Impuls 1,2/50 kV/mm |
|---------------------|-------------------|------------------|----------------|---------------------|
| 2,2 | Min.olje | 8,00 | 60,0 | > 100# |
| 4,4 | Papir | 4,00 | 85,0 | 155,0 |
| 4,4 | Papir | | 85,0 | 155,0 |
| 4,4 | Papir | 4,00 | 85,0 | |

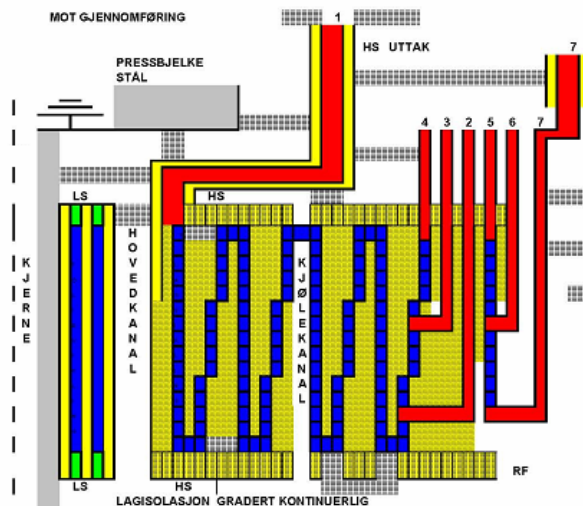
Avhengig av elektrodeform AC 1 min.

| Dielektr. Konst. er | Isolasjons-medium | Felt-påkj. kV/mm | AC 50 Hz kV/mm | Impuls 1,2/50 kV/mm |
|---------------------|-------------------|------------------|----------------|---------------------|
| 3,2 | FR3 olje | 5,75 | 60,0 | > 100# |
| 4,6 | Papir | 4,00 | 85,0 | 155,0 |
| 4,6 | Papir | | 85,0 | 155,0 |
| 4,6 | Papir | 4,00 | 85,0 | |

Feltpåkj. Kontinuerlig

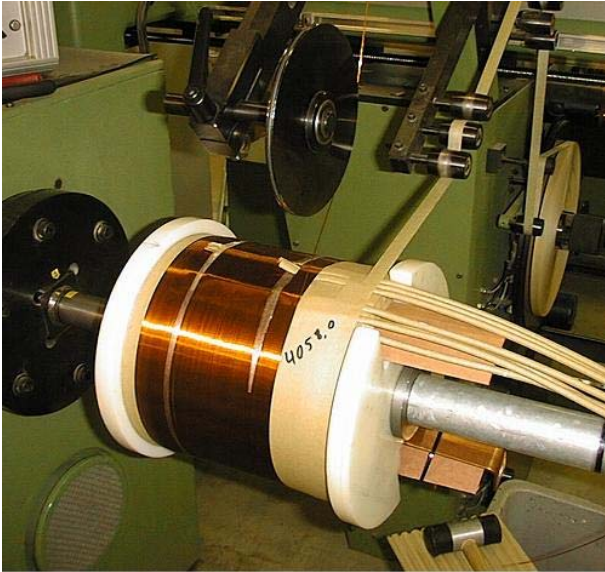
Holdfasthet

Tabellen over viser beregnet fordelingen av elektrisk feltpåkjenning i det homogene området. De to kolonnene til høyre viser holdfasthet ved 1 minuttss prøve 50 Hz og støtprøve, impuls 1,2/50 mikrosekund. Oljens holdfasthet er som nevnt avhengig av oljeavstanden. Tynne oljeskikt har høyere holdfasthet. Dette oppnås best ved å dele opp oljeavstanden med mange lag med tynt papir. I transformatorer som er spesielt utsatt for lynoverpenninger, benyttes papirtykkelser ned mot 0,03 mm hvor isolasjonslagene graderes kontinuerlig. Bilde 3 og 4. Isolasjonen er konisk med totalt tykkere isolasjon der spenningsforskjellen ved vanlig drift er størst.



Bilde 3 prinsipp konisk høyspent isolasjon

En optimalisering av lagsisolasjonen slik at den totale mengden isolasjon mellom lagene blir minst mulig, bedrer kapasiteten i viklingen. Det gir en bedre spenningsfordelingen over lagene og mindre påkjenning ved impuls som lynoverspenninger og koblingsoverspenninger.



Bilde 4 Vikling med kontinuerlig gradert tynt papir

5. Temperaturstigning og Risiko

Levetiden til mineraloljetransformatorer har erfaringsmessig vist seg å være 30-50 år eller lengre. Årsaken til dette er lav gjennomsnittsbetlastning på 40-70%. Nettselskapene ønsker gjerne å belaste transformatorene høyere. Dersom dette skal gjøres med lav risiko, må man sørge for at papirisolasjonen holdes tørr.

FR3-oljens utmerkede egenskap i å holde papiret tørt, gjør det mulig å belaste transformatorer høyere uten at levetiden reduseres og med høyere grad av sikkerhet. [2] Levetiden for papirisolasjon kan utledes fra Montsingers regel og Arrhenius lov om kjemisk nedbryting. Levetiden er avhengig av gjennomsnittstemperaturen i det varmeste punkt (hot-spot) i isolasjonssystemet. I en 3-fase transformator vil dette punktet være i øvre del av midtbenet i enten lavspent- eller høyspentvikling. Ved å måle gjennomsnittlig toppoljetemperatur og samtidig ha kjennskap til temperaturstigning til varmeste punkt, kan levetiden anslås. [6] Temperaturstigning til varmeste punkt er avhengig av transformatorens konstruksjon (design). I små fordelingstransformatorer er denne temperaturstigningen høyere på grunn av viklinger med mange lag og tørt (vindinger) sammenlignet med større transformatorer med færre tørt og mer kjølekanaler.

Varmeprøver etter IEC60076-2 viser tilnærmet lik temperaturstigning i FR3- og mineral-olje. Temperaturstigningen for silikonolje blir 4-5 °K høyere på grunn av høyere viskositet.

6. Brannsikkerhet og Pålitelighet

Mineralolje er lite giftig og er 25% nedbrytbar i naturen. [1] Det lave brennpunktet på 150 °C fører imidlertid til bygningskostnader for å ta vare på brannsikkerheten.

I Norge har vi lenge hatt kravet at ONAN-installasjoner i bygninger med samlet ytelse på over 1600 kVA skal ha automatisk brannslukkings-anlegg eller oljegrube og at KNAN transformatorer med brannhemmende oljer og brennpunkt over 300 °C, kan installeres i bygninger med samme krav som tørre transformatorer. Det må imidlertid anordnes terskel eller oppsamlingskar for oljen i tilfelle lekkasje skulle oppstå.

Silikonoljetransformatorer har vært benyttet i tunneler og bygninger i 30 år med stort sett gode erfaringer.

Kontaktproblemer i trinnkoblere er blitt rapportert . Silikonolje er ikke biologisk nedbrytbar.

I bygninger og tunneler # er FR3-olje ett godt alternativ, da den er brannhemmende med meget høyt brennpunkt på 360 °C og er 99% biologisk nedbrytbar.

I nye forskrifter [8],[9],[10] settes grensen til maksimum 900 kg (1000 liter) pr. transformator både når det gjelder ONAN og KNAN og maksimum 3 transformatorer i samme rom uten olje-grube, kun oljeopsamlingsanlegg med terskel eller kar.

I eldre 1600 kVA transformatorer var det ikke uvanlig med oljemengder på 1100 kg. Dagens ONAN 1600 kVA kompakte transformatorer, Powesafe [6] har en oljevekt på bare 695kg. (790 l) . En 2000kVA har 818kg olje (930 liter)]

Transformatorer type ONAN og KNAN tillates ikke inne i vegtunneler, kun type tørr AN. [8]

7. Miljø, Håndtering og Vedlikehold

Miljøolje Envirotemp FR3 er en naturlig ester.

FR3-oljen er klar, luktfri og lysgrønn på farge.

98,5 % av oljen er planteolje. De resterende 1,5% er antioksidant, farge og additiv for reduksjon av viskositeten ved lave temperaturer. Stivnepunktet for FR3 er -21 °C. Dersom man sammenligner kaldstart av en FR3 transformator med en mineraloljetransformator, vil overtemperaturene i FR3 transformatoren få et oppsving de første 3 timene sammenlignet med mineraloljetransformatoren. Tester er utført med kaldstart ved -30 °C. [7]

Dette kortvarige oppsvinget vil være ca 30-40°C høyere enn forløpet til mineralolje. På grunn av at omgivelsestemperaturen er lav vil det ikke oppstå hot-spot temperaturer som er farlige for papirisolasjonene i transformatoren. Den elektriske holdfastheten beholdes selv om oljen stivner til geleform ved lave temperaturer under -21 °C.

FR3-oljen er i seg selv ufarlig for miljøet. Ingen helsefare er angitt. Likevel skal all brukt transformatorolje sikkerhetsmessig behandles som farlig avfall (tidligere definert som spesialavfall). Selv om en ny transformator er plombert, har man ingen garanti for hva som skjer ved vedlikehold eller evt. skifte av eier, f.eks etterfylling av olje. En aldret transformatorolje vil spesielt i åpne systemer med ekspansjonstank, inneholde slam og rester fra materialer som følge av oksidering og nedbryting av materialer. Erfaringer viser at aluminiumsviklinger holder isolasjonssystemet reneest sammenlignet med kobber.

Når mineralolje aldrer /oksidere dannes det syrer som er forholdsvis aggressive. Dette kan føre til belegg på viklingene som reduserer kjølingen og virker korroderende. I FR3-olje dannes det ved aldring minimalt med syrer og slam. De syrene som dannes er dessuten langt mindre aggressive sammenlignet med aldring i mineralolje.

FR3-olje er den transformatoroljen som gir minst forurensning i jord og vann ved en eventuell lekkasje ut fra våre synspunkter.



Hermetiske transformatorer reduserer oksidering og dannelsen av syrer generelt i alle typer transformatorer. På grunn av at FR3-oljen er biologisk nedbrytbar ved tilførsel av oksygen må isolasjonssystemet være hermetisk lukket. Transformatorer med ekspansjonstank og andre typer hvor oljen er i direkte kontakt med luft anbefales ikke for FR3-olje. Ved vedlikehold av transformatorer anbefales at oljen helst ikke eksponeres mot luft i mer enn 2 uker.

Det vil imidlertid ikke kunne måles endring i tapsfaktoren for oljen før etter at den har stått åpnet i et

år dersom overflaten mot oksygen er liten, f.eks gjennom en pusteplugg eller påfyllingsrør.

I Nord-Amerika hvor FR3-oljen er utviklet, er det praksis å bruke en luft-”pute” på toppen av små enfase transformatorer. Når beholderen er lukket er ikke dette noe problem for FR3. Det er kun åpne systemer, som til eksempel fritt pustende ekspansjonstanker som vil føre til nedbryting av og evt. skade oljen.

Ved påfylling av FR3 på eldre større transformatorer som har åpne isolasjonssystemer, har man mulighet for å bruke en belg og på den måten lukke systemet.

Silikonolje er ikke blandbar med andre transformatoroljer. Selv små rester av silikonolje i andre oljer, kan føre til skumming under vakuumpuffing eller i forbedringsanlegg.

FR-3 oljen er blandbar med mineralolje og blant annet syntetiske estere. Dersom man vil skifte olje til FR3, bør man likevel være klar over at brennpunktet vil falle dersom FR3 inneholder mer enn 7% mineralolje.

8. Konklusjon

I planleggingen av fremtidens fordelingsnett, kan transformatorer med miljøolje FR3-olje bidra til økt sikkerhet både for mennesker og miljø direkte og indirekte.

Pålitelige fordelingsnett kan bygges med høyspent fordelingsnett inn til de lokale lastsentra, hvor lavtaps FR3 transformatorer plasseres.

De utmerkede tekniske og miljøvennlige egenskapene til FR3 er et godt kosteffektivt valg for fremtiden.

7. Referanser

- [1] Cooper Power Systems, www.cooperpower.com
- [2] Ageing of Kraftpaper in Natural Ester Dielectric fluid. Graz ICDL 2002
MacShane, Rapp, Cockran, Gauger, Luksich
- [3] H.P. Moser
Transformerboard 1979
- [4] H.P. Moser / V.Dahinden
Transformerboard II 1987
- [5] Weidmann Systems International AG
www.weidmann-systems.com
- [6] Møre Trafo AS
www.moretrafo.no
- [7] Behavior of Ester Dielectric Fluids Near the Pour Point. IEEE Conference 17-20 okt. 1999 Austin TX. Rapp, Gauger, Luksich.
- [8] FEF 2006 med Veiledning og Elsikkerhet, www.dsb.no
- [9] NEK 440 -2006 (Cenelec HD637 S1)
- [10] NEK IEC 61936-1 -2005