

Revner i Siemens Geafol transformere fra Middelgrundens Vindmøllepark.

Forhistorie.

Der har nu været 15 transformerhavarier i de 20 møller i vindmølleparken. Heraf er den ene fejl forårsaget af overslag til en fejlmonteret Pt-100 temperaturføler (M19).

Ved de øvrige 14 transformerhavarier er overslaget sket det samme sted i toppen af en HV-spole. Ved opskæring af spolerne har det vist sig at overslaget sker imellem den aluminiums-udføringssende, der forbinder terminalen med den øverste aluminiumsspole og den ende af spolen, der er forbundet med den næstøverste spole.

Energi E2 ejer de 10 nordlige møller (M1 til M10) medens Middelgrundens Vindmøllelaug ejer de 10 sydlige møller (M11 til M20). Begge parter har nu haft 7 ordinære transformerhavarier.

Revneundersøgelser.

Der har været mange undersøgelser for at finde årsagen til fejlene, og nogle af disse undersøgelser har afsløret omfattende revnedannelser bl.a. ved skadestedet.

Arbejder udført af ingeniør Martin L. Olsen Danish Technological Institute.

[*Draft Technical Report on Failure Analysis of Siemens Geafol cast-resin Transformers.*](#)

Technical report no.: 1154834-1. Tre bilag (Appendix [A](#), [B](#) and [C](#))

Date: May 21th, 2003.

Denne rapport findes både i en dansk og en engelsk version..

Martin Olsen skriver bl.a.:

Der er fundet sammenhæng mellem fejlstederne på "alle" tidligere skader og en revnedannelse fundet i de undersøgte HV spoler.

Da revnedannelsen er lokaliseret i både en skadet spole og også i to ubeskadigede spoler, er der belæg for at antage en sammenhæng med skadesårsagen.

Derfor mener vi at et sandsynligt scenarium kan være:

- *På grund af revnedannelser i det kendte fejlområde, forringes isolationssystemet så meget at overslag til sidst indtræder.*
- *Revnedannelserne kan være medfødte eller skabt af indspænding og sprængning på grund af termiske forhold under driften.*

Efter vores opfattelse er det mest nærliggende at antage, at revnedannelserne skyldes termiske forhold, og materialernes forskellige udvidelseskoefficienter.

At vi fandt så mange revner er kommet meget bag på os, og derfor har vi kigget med lup på billeder af nogle af de tidligere undersøgelser udført af Siemens, og måske findes nogle af disse opskårne spoler endnu?

I bekræftende fald tror vi det kunne bringe mere dokumentation af samme type som her præsenteret.

[I appendix A](#) er HV-spole W fra transformer 19 undersøgt ved det normale fejlsted. Spolen er beskadiget ved overslag til en Pt-100 føler, men spolen er udefra set ubeskadiget ved det normale fejlsted.

Nedenstående foto nr. 1 er fra Photo 5 i appendix A.

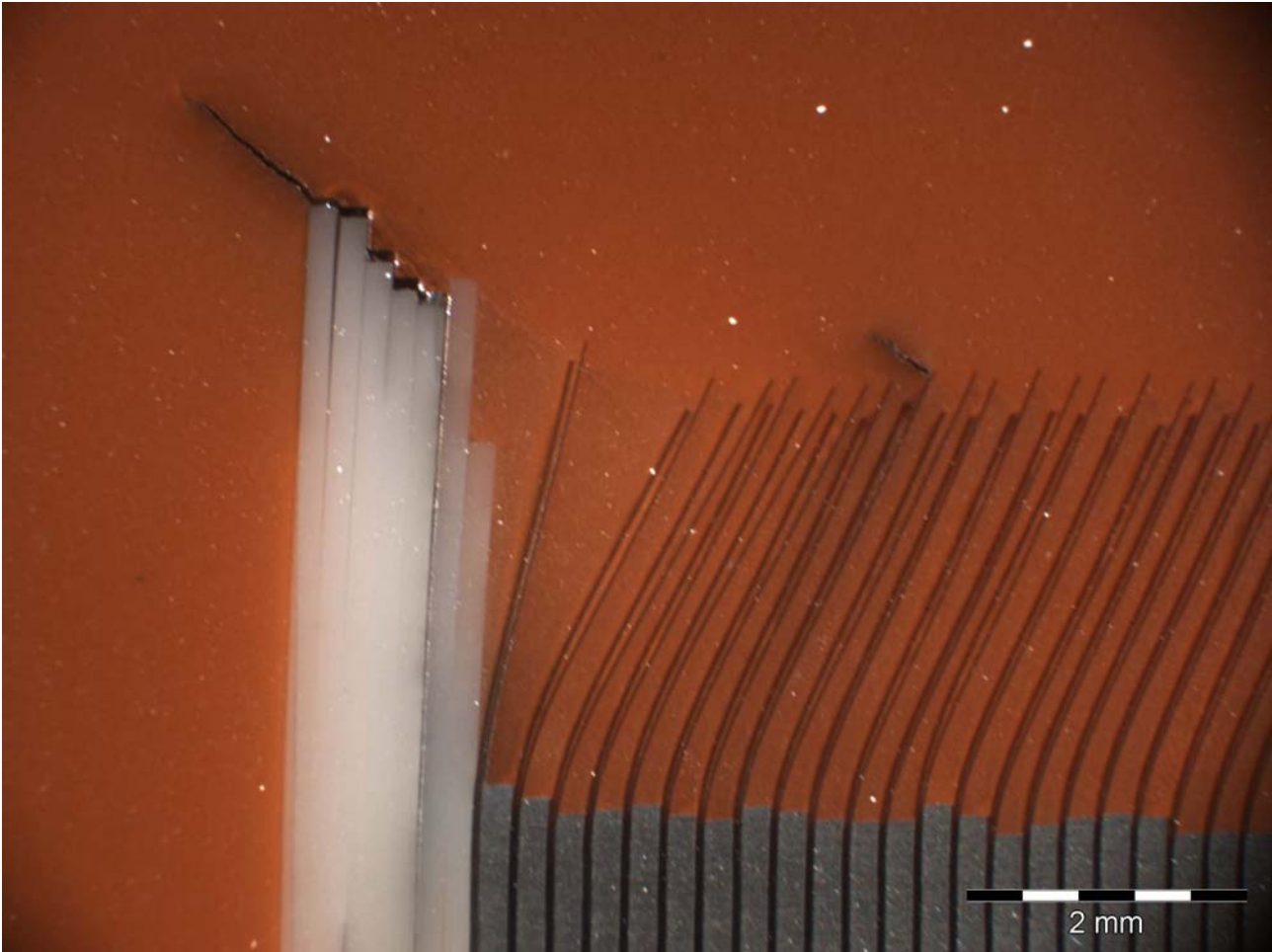


Foto nr. 1.

Det røde materiale er epoxy-støbemasse. Det hvide materiale er toppen af en udvendig mylarfolie-isolation. (Syv lag der hver er 0,2mm tykke). Det grå materiale er toppen af den folieviklede aluminiumspole.

Det ses at der er en skrå revne i epoxyen der har forbindelse til en delaminering imellem 5 og 6 lag af mylarfolie isolationen, således at der ikke er ret meget intakt isolation imellem spolen og revnen. Hvis den skrå revne i epoxyen havde fået lov til at udvikle sig op til udføringsenden, ville vi have haft meget ringe isolation det pågældende sted.

[I appendix B](#) er HV-spole W fra transformer 11 undersøgt ved det normale fejlsted.

Der har været overslag på denne spole.

Photo 1 til Photo 8 med undertekster viser metoder til prøveudtagning og den omhu der er udvist for at hindre at revner opstår ved opskæringen. (En uafhængig transformereksperter, der har besøgt laboratoriet, er overbevist om at revner ikke opstår ved opskæringen)

Nedenstående foto nr. 2 svarer til Photo 22 fra appendix B.

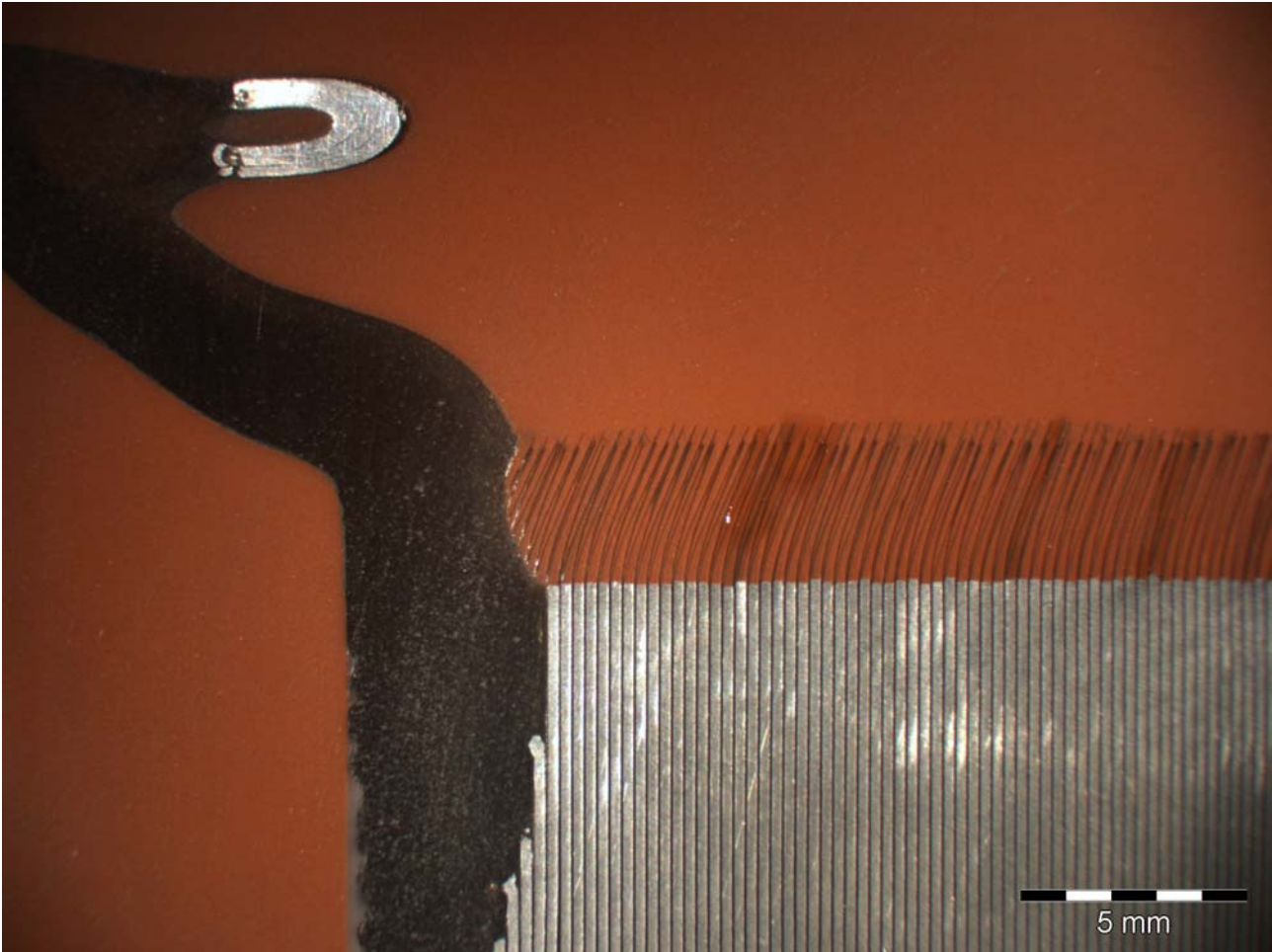


Foto nr. 2

Under dette foto skriver Martin Olsen bl.a.: *Det er vores mistanke, at der har været større revner i det bortbrændte materiale.*

Foto nr. 2 viser overslaget i et snit svarende til de fotos der er vist fra HV-spole W fra transformer 19 herover (foto nr. 1) og fra HV-spole V fra transformer 11 vist herunder (foto nr. 3).

Knækket i det afbrændte materiale ved toppen af mylar-isolationen kan forstås, hvis der inden overslaget havde været en revne som på HV-spole V fra transformer 11.

[I appendix C](#) er HV-spole V fra transformer 11 undersøgt ved det normale fejlsted.

Under et nærbillede af en stor revne skriver Martin Olsen: *Den største af revnerne; det ses at revnen søger ned imellem 3 og 4 lag grundisolation. Dette er måske årsagen til, at fejlen indtrådte på fase W og ikke på V fasen, da der her stadig er noget af grundisolationen tilbage mellem udføringsenden og spolens yderste vindinger.*

Den udvendige grundisolation består af syv lag 0,2 mm tyk mylar folie. Ved 11V er der fire lag intakt isolation fra revnen ind til spolen, medens der ved 19 W kun er to lag intakt.

Nedenstående foto nr. 3 svarer til Photo 16 i appendix C.

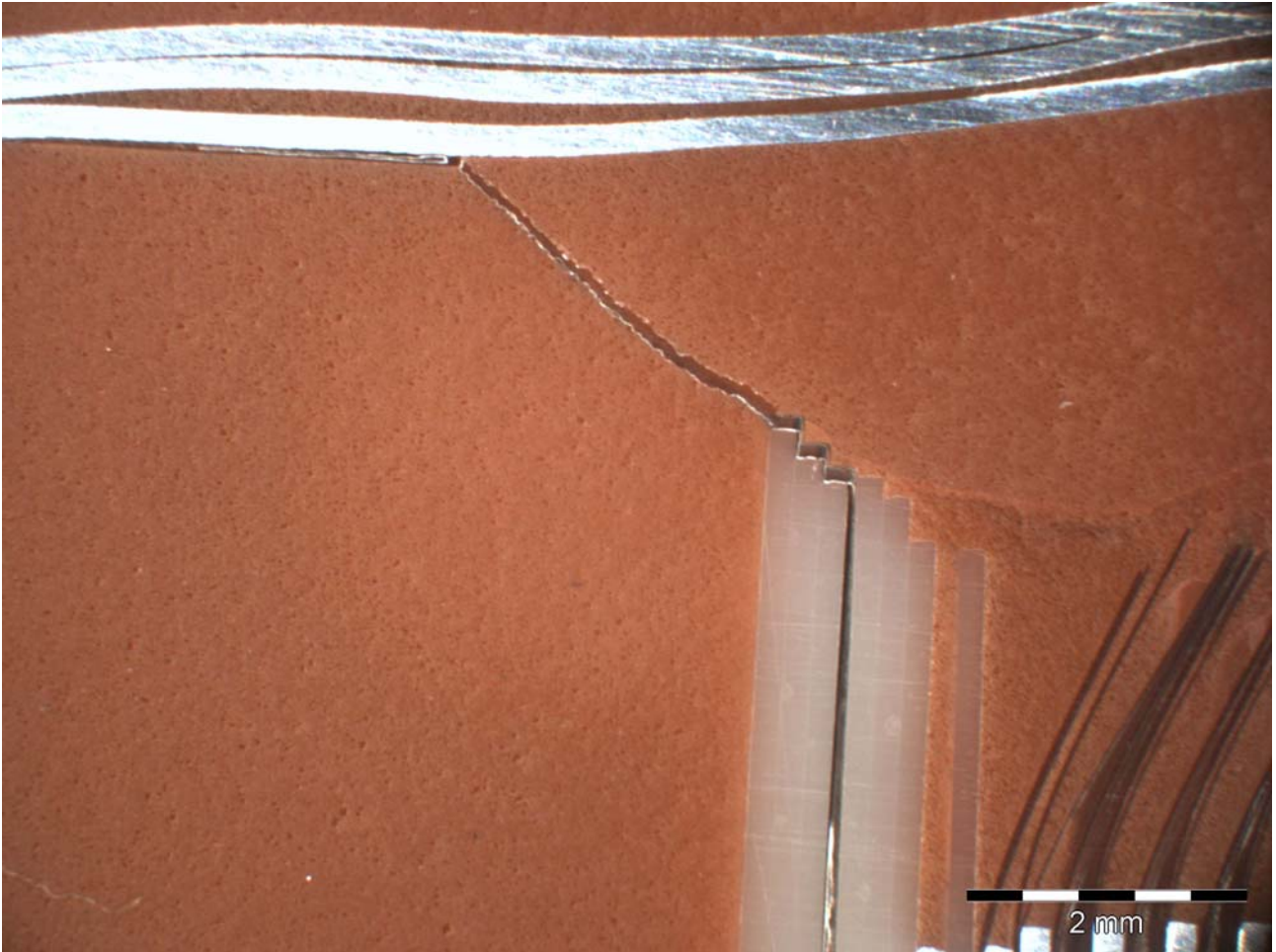


Foto nr. 3

Under dette foto skriver Martin Olsen: *Den store revne har her udbredt sig helt til udføringsenden og følger dennes underside et stykke til venstre.*

[TEKNISK RAPPORT vedrørende fejlanalyse af Siemens Geafol cast-resin transformere.](#)

Teknisk rapport nr.: 1154834-2. Tre bilag ([Bilag A](#), [Bilag B](#) og [Bilag C](#))

Dato: 16-12-2003.

I denne rapport beskrives undersøgelser foretaget andre steder i toppen af HV spole fra mølle 11 fase W end ved det normale fejlsted. Desuden er den store revne fra mølle 11 fase V (vist på foto nr. 3 herover) undersøgt med elektronmikroskopi; man har ikke været i stand til at dokumentere elektrisk aktivitet i den undersøgte revne.

Prøverne er udtaget henholdsvis på siden af HV spolen, hvor indstøbningsmassen er meget tyndere, samt på spolens bagside, hvor indstøbningsmassen har samme tykkelse og geometri som spole forsiden med den forskel, at der ikke er nogen udføringsende, som påvirker indstøbningen.

Der er fundet revner i samtlige udtagne prøver. Martin Olsen skriver:

Revnerne er fundet i præcis samme område som tidligere set, men er ikke så store/ udviklede som tidligere set, hvilket vi umiddelbart mener skyldes, at indstøbningsmassen ikke er "svækket" af en udføringsende, som det har været tilfældet ved tidligere prøver.

Det er vores overbevisning at de revner, vi har påvist i undersøgelsen, er opstået før prøveudtagning og bearbejdning.

Ved undersøgelsen er der endvidere fundet revneudbredelser ned i det yderste folie isolationsmateriale og ikke i de forventede overgange mellem enkelte folielag.

Dette fænomen underbygger efter vor opfattelse, at revnerne er opstået før prøveudtagning. En revne opstået i forbindelse med prøveudtagning vil ikke delaminere et mylarlag, men skabe revner i overgangen imellem de enkelte mylarlag og indstøbningsmasse. En revne opstået i forbindelse med en "for stor" temperaturforskel i transformerens enkeltdele vil kunne skabe forskydningskræfter på langs af spolesystemet og dermed på langs af mylarlagene. Denne forskydningsspænding vil kunne skabe revner i selve mylarlaget. Indspændingsforholdene varierer med driftsituationen, termiske forhold samt størrelsen af de "restspændinger" i støbemassen, der opstår under fremstillingen og af hærden af spolesystemet.

Arbejder udført af Per Nielsen FORCE Technology Aalborg.

Middelgrunden vindmøllepark

[Ultralydsundersøgelse for revner i toppen af transformatorer. 5 sider.](#)

Per Nielsen d. 28.05.2004.

De intakte HV spoler på Siemens Geafol transformatorer fra mølle 18 og mølle 20 blev ultralydsundersøgt i toppen på det sted hvor overslag normalt sker. På mølle 18 havde der været overslag på fase U og på mølle 20 havde der været overslag på fase W, d.v.s. at det var 18 V, 18 W, 20 U og 20 V der blev undersøgt.

Der blev fundet en stor revne i spole 20 U ved det normale fejlsted.

Billederne i rapporten er orienteret, så spolens udvendige side er til højre. (På billederne herover fra Martin Olsens arbejder er udvendig til venstre).

Det i rapporten omtalte referenceemne er en udskæring fra mølle 19 fase W, se foto nr. 1 herover.

Middelgrunden vindmøllepark

[Ultralydsundersøgelse for revner i toppen af transformatorer. 12 sider.](#)

Per Nielsen d. 10.07.2004.

De seks Siemens Geafol transformere som Middelgrundens Vindmøllelaug havde i brug i juli 2004 blev ultralydsundersøgt. Det var i alt atten HV spoler, der blev undersøgt.

Per Nielsen skriver i konklusionen:

På spole 12U – 12W – 13U – 13V – 13W – 14V – 15V – 15W kunne der konstateres indikationer på revner, tilsvarende de revne indikationer der fremkommer på reference emnet.

Det vil sige at der i otte af de atten spoler er konstateret markante revner inde i spolen ved det sted, hvor overslag normalt sker. Revnerne går ikke op til overfladen, men skråt op i epoxy-støbmassen fra den udvendige mylar-isolation ligesom på de viste fotos fra 11V og 19W herover.

Ved nærmere studier af billederne fra ultralydsundersøgelserne kan det ses, at der er meget store revner i spole 12U og i spole 15V.

Middelgrunden vindmøllepark

[Ultralydsundersøgelse for revner i toppen af transformatorer. 6 sider.](#)

Per Nielsen d. 02.02.2005.

Der kom et overslag på transformer 12 fase U d. 23.12.2004. Data indsamlet til brug i rapporten dateret d. 10.07.2004 blev brugt til stedbestemmelse af revnen set oppefra i denne rapport. Som det ses i rapporten dateret d. 10.07.2004, var der i denne spole grund til at forvente kraftigt svækket isolation.

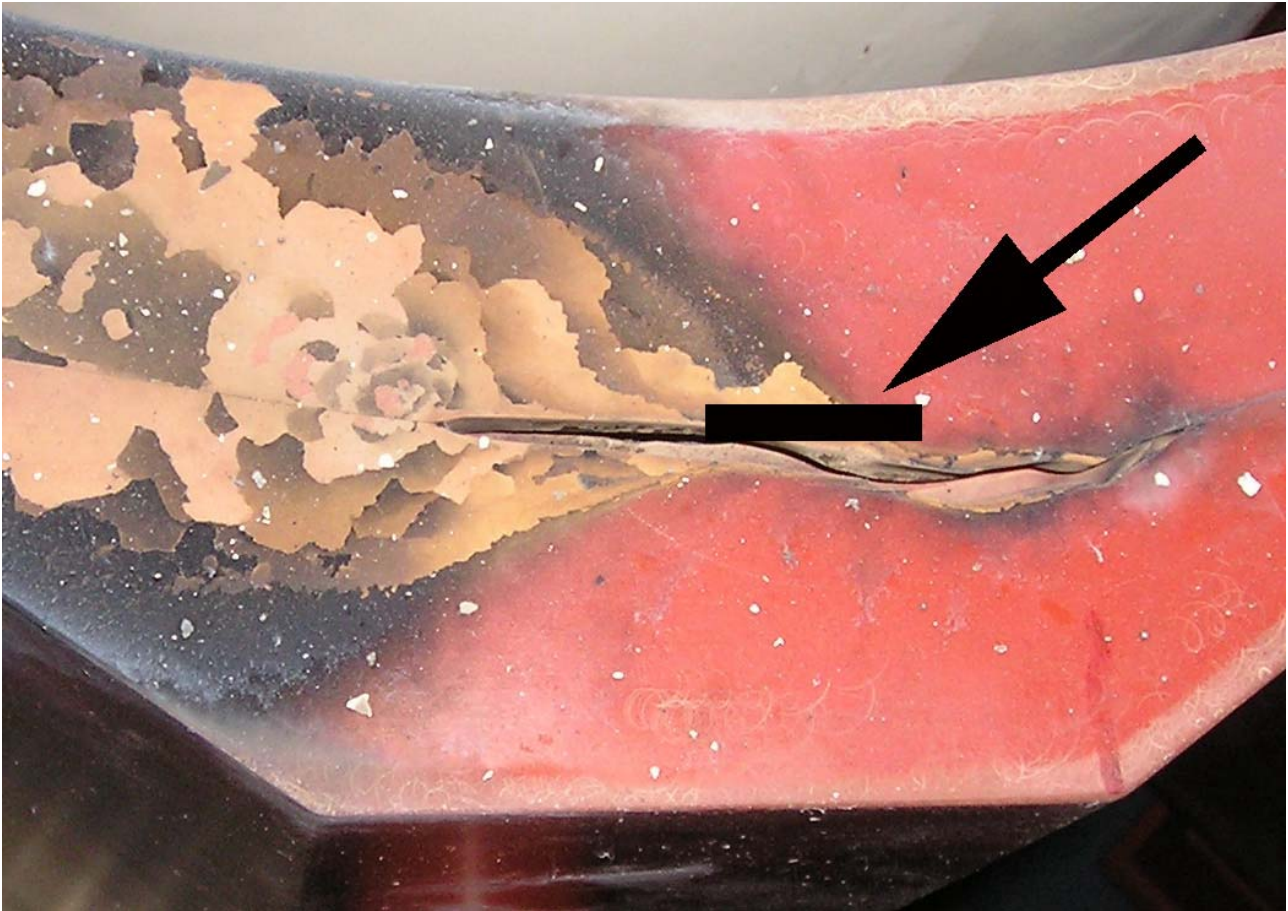


Foto nr. 4: Den kortslyttede transformeren fra mølle 12. Det markerede område viser, hvor der var en revne i transformeren inden den kortslyttede. Det ses, at kortslytningen skete præcis, der hvor revnen på forhånd var konstateret.

Arbejde udført af Teknologisk Institut, Center for Plastteknologi.

[VURDERING AF MYLARFOLIE OG STØBEEPOXY ANVENDT I TRANSFORMATORKONSTRUKTION.](#)

Dato	2004.06.03
Sagsnummer	1236873
Sagsansvarlig	Civilingeniør Ole Kiilerich
Antal rapportsider	5
Antal bilag	2

Rapporten omfatter flere dele:

Undersøgelse af de termiske egenskaber af mylarfolie og støbeepoxy ud fra nogle prøver udtaget fra en defekt transformeren. Ole Kiilerich skriver:

”Materialekarakteriseringen påviser, at der forekommer særdeles markante ændringer af de organiske materialers (støbeepoxy og mylarfolie) E-moduler og termiske lineære varmeudvidelseskoefficienter.”

Glasovergangstemperaturerne er målt til 108 °C for mylarfolie og til 93 °C for støbeepoxy. De fundne materialeegenskaber er brugt i den efterfølgende FEM-beregning.

Der er udtaget to prøver til måling af trækspændingen i epoxy-støbemassen. Det påvises at der er betydelige ”indefrosne” trækspændinger nær det normale skadessted. Disse spændinger går på tværs af revner som den påvist på foto nr. 1.

Vurdering af FEM-beregning. Herfra kan citeres:

”Når disse beregnede spændinger sammenholdes med de observerede betydelige svindspændinger... må det alvorligt befrygtes, at de resulterende spændinger er af samme størrelse som materialets trækbrudspænding..., og at selv små indbyggede irregulariteter medfører kærsvirkning og revneudvikling”.

Sammenfatning og rekommandationer. Herfra kan citeres:

”Det vurderes, at anvendelsen af en reformuleret epoxystøbemasse, som ikke udviser et volumensvind i forbindelse med hærdeaktionerne, i meget høj grad ville afhjælpe de konstaterede problemer med nedbrud i transformerne.”

Arbejde udført af Tech Inno Aarhus.

[TEKNISK RAPPORT](#)

Beregning af termiske spændinger i vindmølle transformer

Dato: 16. august 2004

Sagsnummer: 2004-11-1

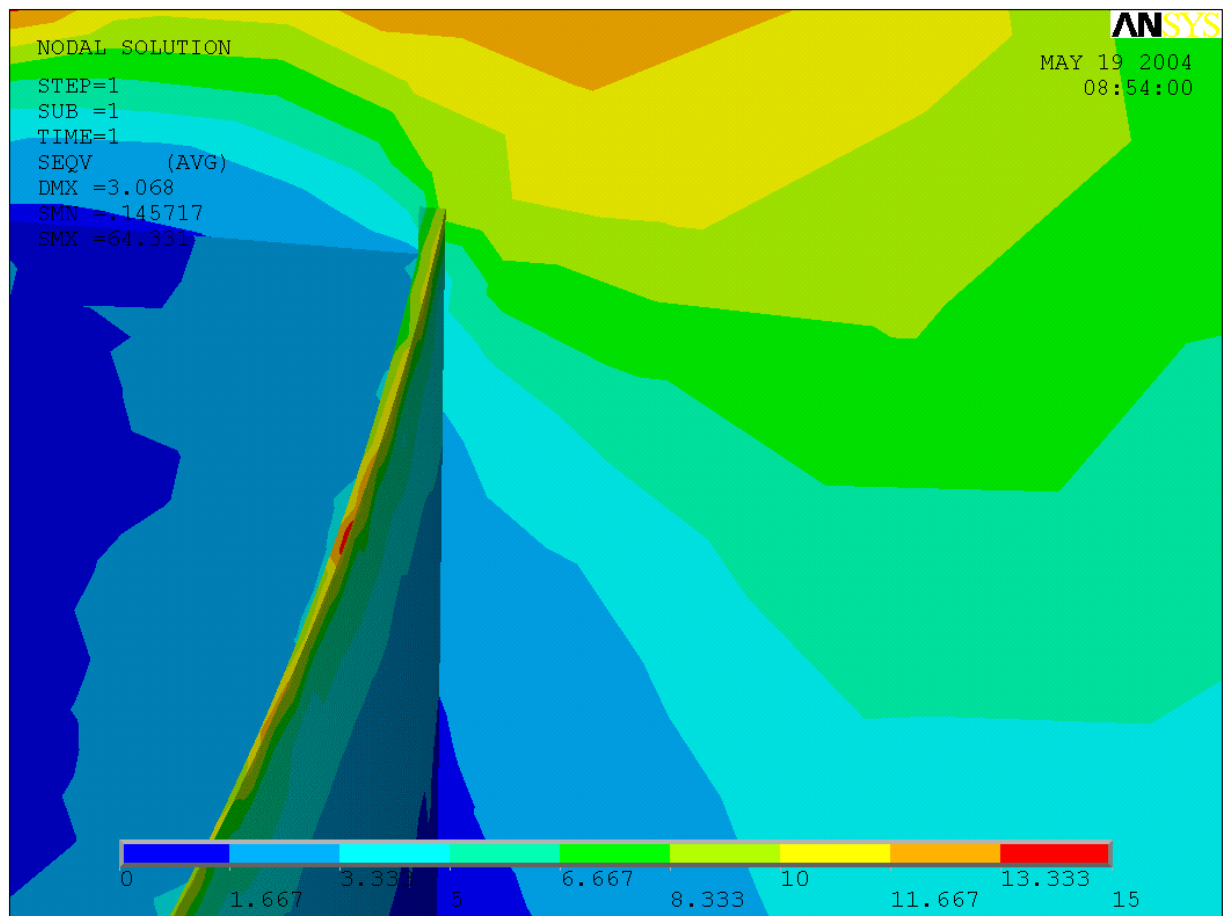
Antal rapportsider 6

Antal bilag 12

Carl Østervig og Martin Holm Tech Inno.

Dette arbejde omfatter den ovenfor omtalte FEM-beregning. Af rapportens konklusion på side 6 fremgår det:

”Der er således klare indikationer for, at de termiske spændinger udgør et væsentligt bidrag til revnerne som forårsager havarierne”.



Billed 5. Plot af von Mises spænding i epoxystøbemasse i område hvor revner er observeret. [Bilag 8] Last er stationær temperaturfordeling. Billedet er et zoom af spændingerne i epoxystøbemassen i nærheden af ”det tykke snit” ved toppen og ydersiden af spolen. Det kan her observeres, at der optræder en spændningskant netop langs kanten af spolen hvor revnerne er konstateret.

Mulige tiltag i forbindelse med revne problemer.

Middelgrundens Vindmøllelaug har valgt at udskifte defekte Siemens Geafol 2 MVA med en specialdesignet ABB 2,5 MVA transformer. Ifølge beregninger og målinger er ”hot spot” temperaturen i ABB transformeren reduceret med 30 °C i forhold til ”hot spot” temperaturen i Siemens Geafol transformeren.

ABB transformeren har 23 serieforbundne HV-spoler i stedet for 12 serieforbundne HV-spoler i Siemens Geafol. Det betyder at der er lavere spænding over de enkelte spoler i ABB transformeren. ABB har ikke den udvendige mylarfolie-isolation. Deres transformer-designer mener at det er uheldigt at have så meget mylarfolie det pågældende sted. Martin Olsens arbejder tyder også på at revnerne starter i mylarfolien, idet der er fundet store revner her med forbindelse til små revner i støbe-epoxyen.

Der har ikke været nedbrud i nogen af de fem ABB transformere som Middelgrundens Vindmøllelaug har i brug.

Energi E2 har valgt at køle deres transformere samt at montere overspændingsafledere. Ved Transformerdag på DTU, d. 14. Januar 2004 holdt Asger Jensen Energi E2 et indlæg med titlen "Specielle forhold ved anvendelse af tørtransformere i vindmøller." hvor han blandt andet viste kurver, der demonstrerede de voldsomme lastvariationer man kan have i vindmøller. Disse store lastvariationer giver naturligvis store temperaturvariationer i spolerne, når transformeren kun akkurat er dimensioneret til den normerede belastning.

Energi E2 har valgt at køle deres Siemens Geafol transformere med blæsere. De har målt en temperaturreduktion, som de finder meget tilfredsstillende (Notat. Virkning af blæsere monteret på transformeren på MGR mølle 1)

Energi E2 har også valgt at montere overspændingsafledere på højspændingssiden af deres transformere. Det reducerer spændingstransienter og dermed risici for overslag på steder, hvor isolationssystemet er svækket af revner.

Energi E2 har ikke haft nedbrud på deres Siemens Geafol transformere efter at de har iværksat disse tiltag.

Karsten Borch Gylding
08-05-2006.

Rapporter:

[1] [Draft Technical Report on Failure Analysis of Siemens Geafol cast-resin transformer.](#)
Technical report no.: 1154834-1
Martin Olsen DTI May 21th 2003.

[2] [Teknisk rapport vedrørende fejlanalyse af Siemens Geafol cast-resin transformer.](#)
Teknisk rapport nr. 1154834-2. Martin Olsen DTI 16-12-2003.

[3] [Ultralydsundersøgelse for revner i toppen af transformatorer.](#)
Per Nielsen FORCE Technology d. 28.05.2004. Revideret d. 18.08.04.

[4] [Middelgrunden vindmøllepark. Ultralydsundersøgelser for revner i toppen af transformatorer.](#)
Per Nielsen, FORCE Technology d.10.07.2004.

[5] [Middelgrunden vindmøllepark. Ultralydsundersøgelser for revner i toppen af transformatorer.](#)
Per Nielsen, FORCE Technology d.02.02.2005.

[6] [Vurdering af mylarfolie og støbeepoxy anvendt i transformator konstruktion.](#)
Sagsnummer 1236873, to bilag. Civilingeniør Ole Kiilerich, Teknologisk Institut, Center for Plastteknologi 2004.06.03

[7] [Beregning af termiske spændinger i vindmølle transformer. Teknisk Rapport.](#)
Sags nr. 2004-11-1. Carl Østervig og Martin Holm, Tech Inno. 16. august 2004.