



Smart solutions.
Strong relationships.

Újdonságok a transzformátorok termikus viszonyainak megismerésében

(2018. évi Cigré konferencia összefoglalója)

Diagnosztikai Konferencia Bikal, 2018

Dr. Nádor Gábor, K+F vezető, CG Electric Systems Hungary Zrt.

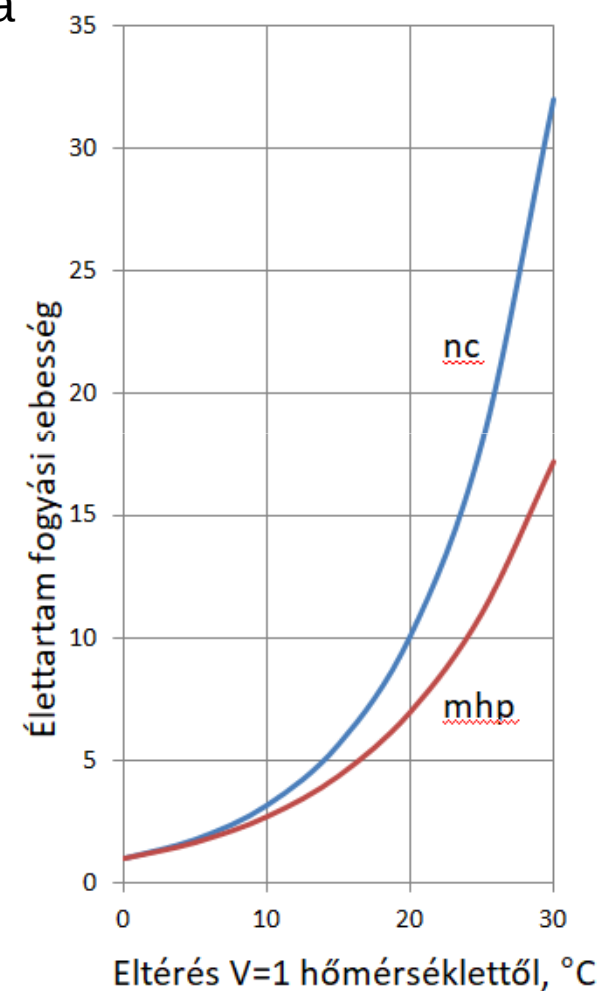


AVANTHA
GROUP COMPANY

- PS1 – Teljesítmény transzformátorok termikus viszonyai
 - ✓ 17 cikk a poszter szekcióban
 - ✓ Főbb témák:
 - Melegedés mérés bizonytalanságai
 - Melegedés mérési módszerek összehasonlítása
 - Tekercshőmérők megbízhatósága alacsony terheléseknél
 - Melegpont tényező meghatározása
 - Melegpont helye a tekercsrendszerben
 - Hideg környezet hatása a melegedésre

Melegponti hőmérséklet szerepe

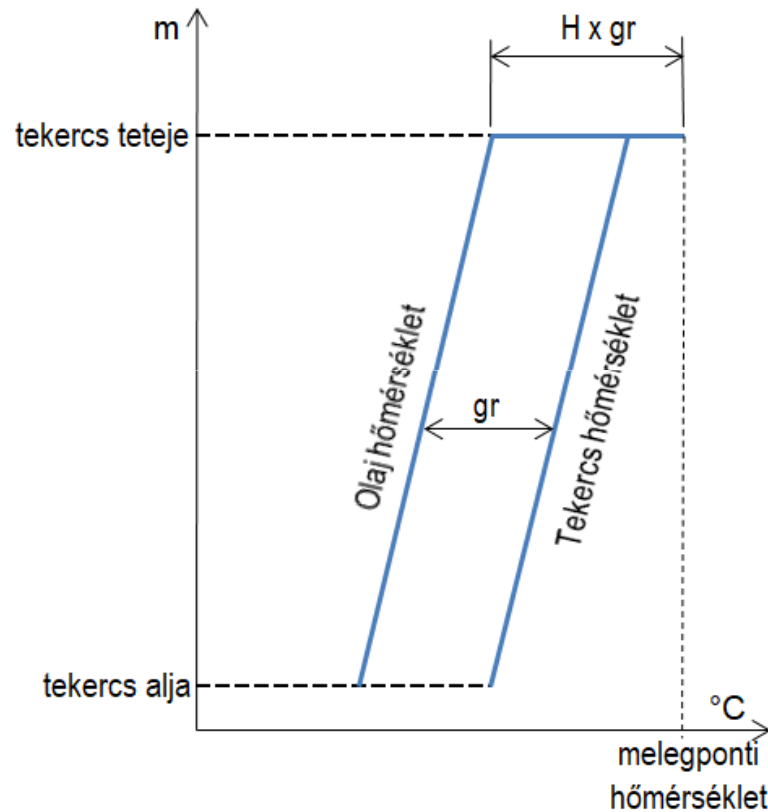
- Olaj-papír szigetelésű transzformátorok élettartamát a cellulóz alapú szigetelés öregedése határozza meg.
- Az **öregedés** sebességét meghatározó tényezők:
 - **Hőmérséklet**
 - Nedvesség
 - Oxigén
- **Buborék képződés** megindulása
 - 0.5% nedvesség tartalom, ≥ 200 Cfok
 - 2.0% nedvesség tartalom, ≥ 140 Cfok
- Alapvető információ
 - **Hűtés vezérléshez**
 - **Termikus védelemhez**
 - **Terhelhetőség meghatározásához**
 - **Élettartam számításokhoz**



A termikus viszonyok ismerete alapvető fontosságú!

Melegedés model IEC 60076-7 szerint

➤ Állandósult állapot



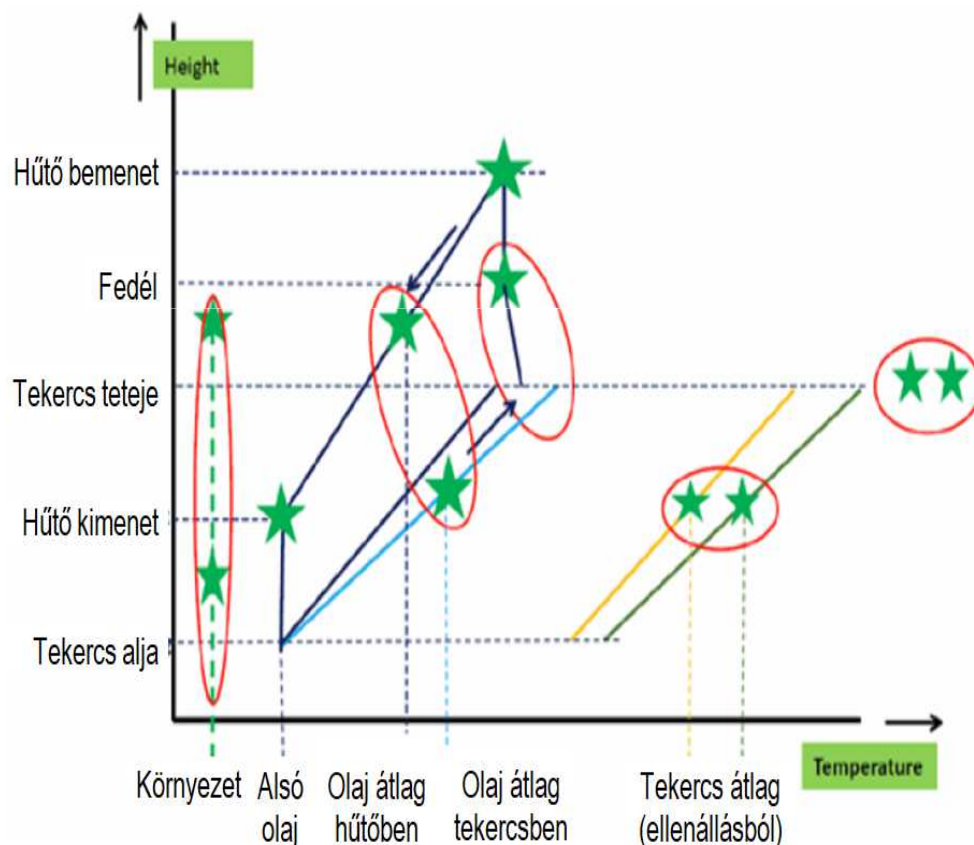
$$\vartheta_{\text{melegpont}} = \vartheta_{\text{környezet}} + \Delta\vartheta_{\text{felső_olaj_tekercsben}} + H \times gr$$

Feltételezések:

- ismerjük az olaj hőmérsékletét a tekercs aljánál és tetejénél
- ismerjük az átlagos tekercs hőmérsékletet
- olaj hőmérséklet lineárisan növekszik a tekercs aljától a tetejéig
- gr tekercs-olaj gradiens a tekercs magassága mentén állandó
- H melegpont tényező ismert

Gyári melegedés mérés bizonytalanságai

$$\vartheta_{\text{melegpont}} = \vartheta_{\text{környezet}} + \Delta\vartheta_{\text{felső_olaj_tekercsben}} + H \cdot gr$$



- időben és térben változó környezeti hőmérséklet
- felső olaj hőmérsékletet a mérhető fedél alatti és hűtőbe belépő olaj hőmérsékletek átlagaként számoljuk
- $gr = \text{tekercs átlag} - \text{olaj átlag}$
 - tekercs átlag lehűlési görbéből
 - olaj átlag a hűtőben és a tekercsekben nem azonos
- H melegpont tényező számítása
 - veszteség eloszlás számítása milyen felbontású (tárcsánként, vezetőként)?
 - folyadékáramlási és hűtési modell részletessége?

További bizonytalanságok

- Hőmérő kalibrálása névleges terhelésű, adott áttételű mérés alapján történik
- Átszámolás más terhelési állapotokra:

$$\vartheta_{\text{melegpont}} = \vartheta_{\text{környezet}} + \Delta\vartheta_{\text{felső_olaj_tekercsben}} * \{(V_{0,n} + V_{rz,n} * K^2) / (V_{0,n} + V_{rz,n})\}^x + H * gr * K^y$$

$$K = I / I_n$$

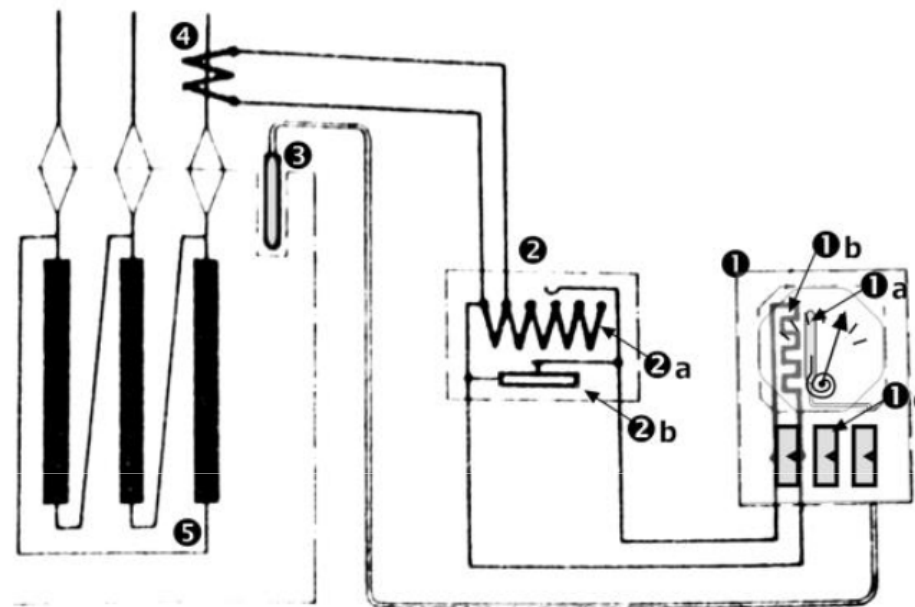
- x és y tényezők két-két mért melegedés különbségéből >>> fokozott bizonytalanság számítható
 - nincsenek figyelembe véve az eltérő áttételnél eltérő H, gr, $V_{rz,n}$ (esetleg $V_{0,n}$) értékek
- Dinamikus modell
 - Olaj időállandó: néhány óra - terhelési állapot függő!
 - Tekercs időállandó: néhány perc - terhelési állapot függő!
 - A felső olaj hőmérséklet lassú változása „becsapja” a hagyományos hőmérőt.

Üzem közbeni melegpont mérési módszerek



Smart solutions.
Strong relationships.

- Közvetett mérés elektromechanikus hőmérővel
 - Felső olajhőmérséklet mérése
 - Melegponti gradiens (H x gr) leképzése terhelőáram függő ráfűtéssel
- Közvetett mérés elektronikus hőmérővel
 - Felső olajhőmérséklet mérése
 - Melegponti gradiens leképzése mért terhelő áramból belső függvényekkel
 - Korlátozottan lehetőséget ad a tényleges melegedési viszonyok pontosabb leképzésére
- Közvetlen melegpont méréssel a tekercsbe épített üvegszál optikás érzékelőkkel

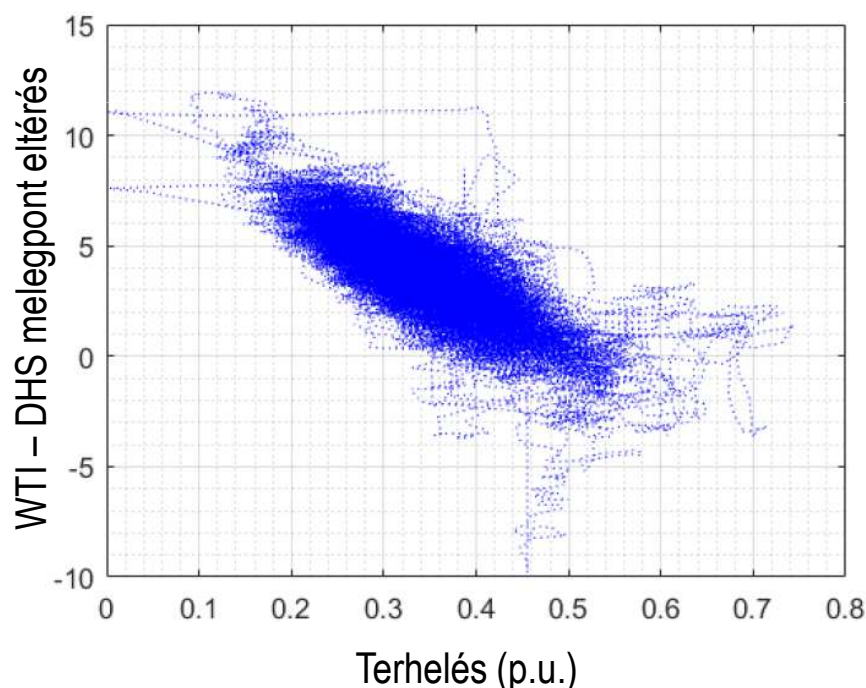


AVANTHA
GROUP COMPANY

Terhelés hatása a melegpont mérés pontosságára



- 400 kV-os transzformátor melegpontjának mérése hagyományos közvetett (WTI) és üvegszál optikás közvetlen (DHS) módszerrel
- Állandósult állapotban, névleges terhelésnél < 3 K eltérés >>> hagyományos hőmérő beállítása elfogadható
- Üzem közbeni folyamatos mérés

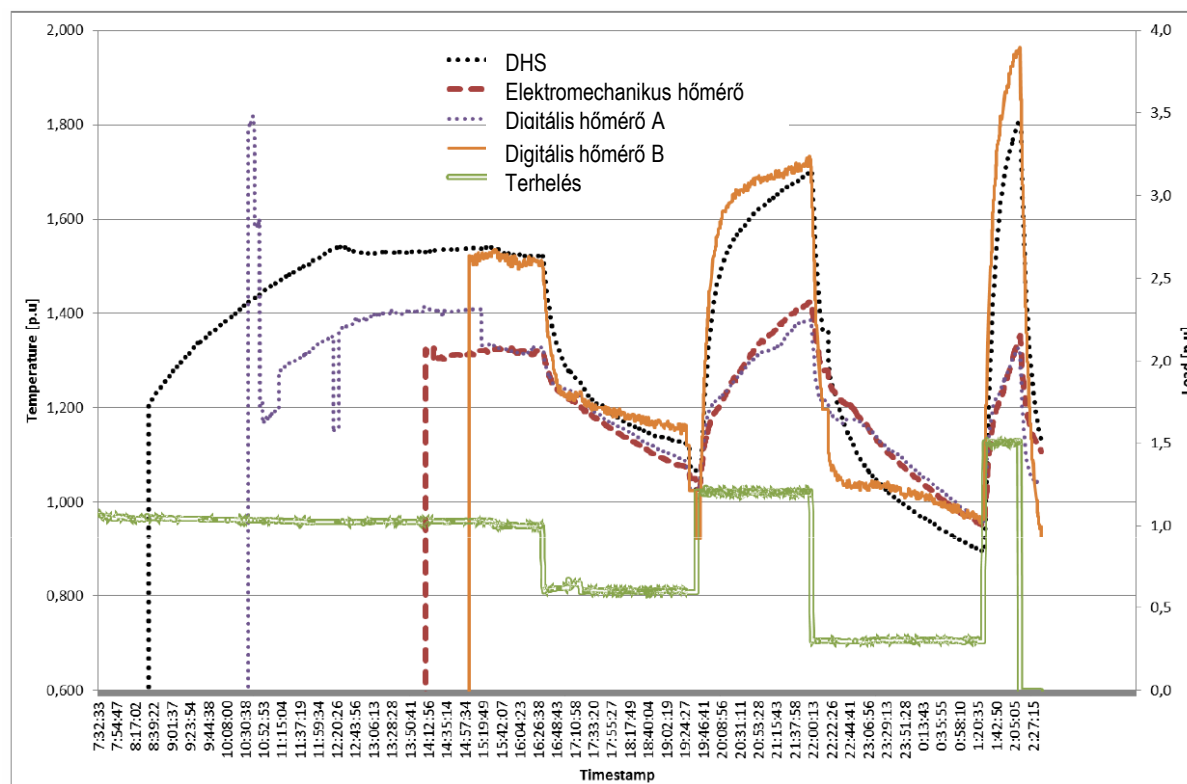


- **WTI által mutatott melegedés alacsony terhelésnél a valóságosnál lényegesen nagyobb**
- Ok: alacsony terhelésnél az állandó veszteségű vasmag fűtő hatása miatt a fedél alatti olajhőmérséklet lényegesen magasabb lehet, mint a tekercsből kilépő olajé

Mérési módszerek összehasonlítása



Smart solutions.
Strong relationships.



225/180/125 MVA
autotransformer
ONAF2/ONAF1/ONAN hűtés

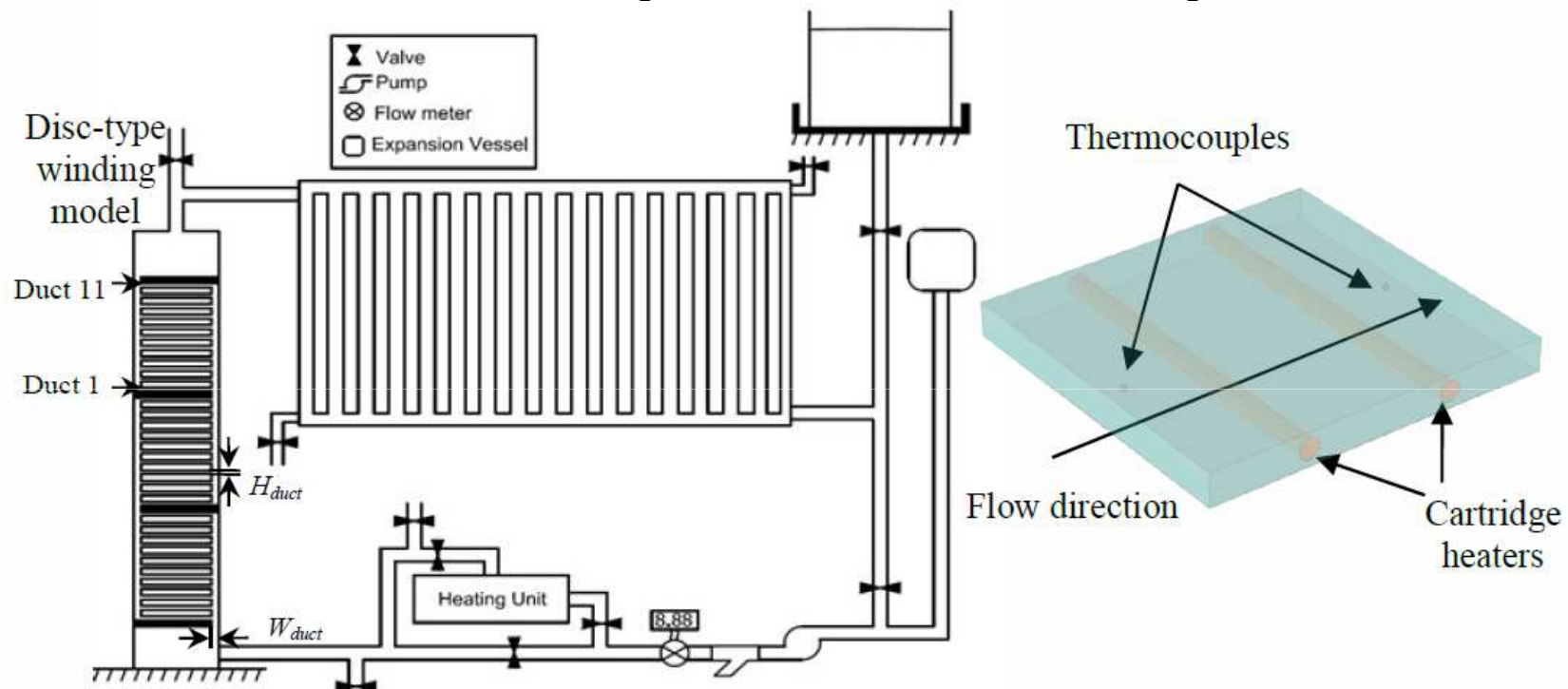
- állandósult, névleges terhelésű állapotban max. 4.65% eltérés a hőmérők között (ábra hiba!)
- az elektromechanikus hőmérő jelentős elmaradással követi a dinamikus terhelés változásokat
- a különböző gyártmányú digitális hőmérők nagyon különböző értékeket mutathatnak

**A dinamikus terhelés változásokat csak a közvetlen
melegpont mérés követi megbízhatóan!**



Melegpont helye a tekercsben

- **Hova tegyük a melegpont érzékelőt?**
- Modell kísérletek áramlási sebesség és hőmérséklet eloszlás vizsgálatára:



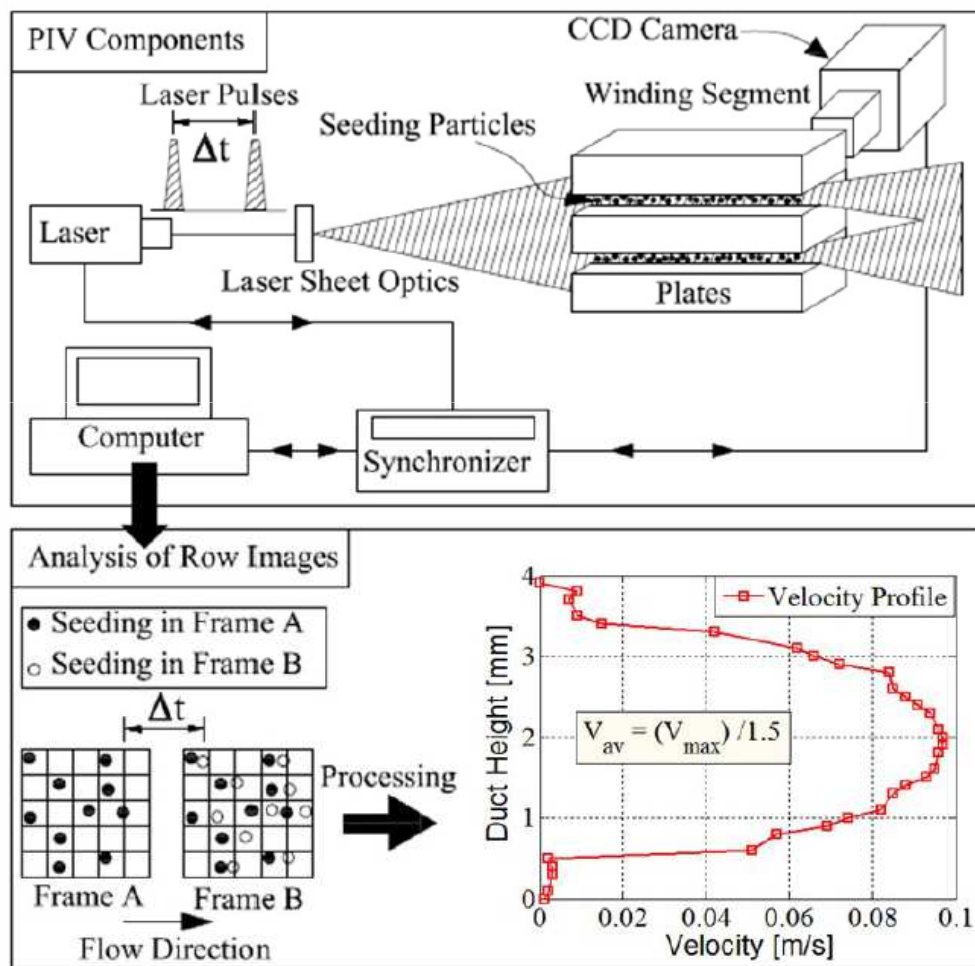
- fűtött alumínium lemezekkel modellezett cikk-cakk hűtésű tárcsák
- 3 járat x 11 olajcsatorna
- átlátszó műanyag burkolat
- hőmérséklet mérése hőelemekkel

Melegpont helye a tekercsben



Smart solutions.
Strong relationships.

- sebesség mérése az olajba kevert gabona szemek mozgásának fényképezésével



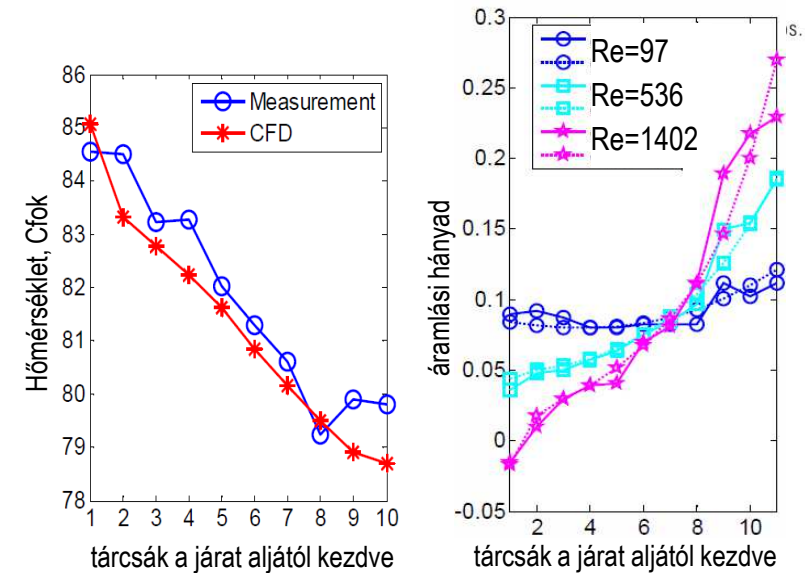
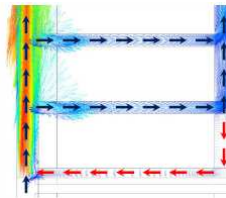
Melegpont helye a tekercsben



➤ Eredmények

▪ nagy olaj sebességeknél (ODAF hűtés):

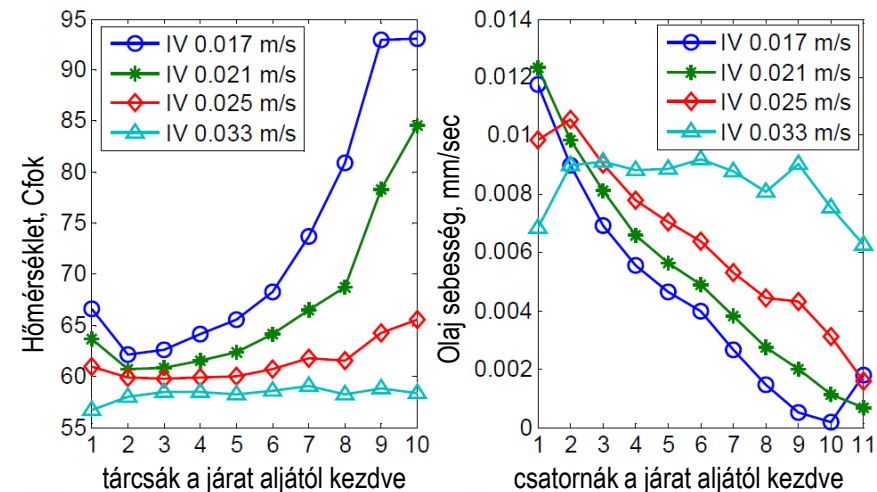
- a Reynolds szám határozza meg az áramlás eloszlását, $Re = 2 \cdot \text{olajsebesség} \cdot W_{duct} / \text{viszkozitás}$
- a legfelső járatban (kis viszkozitás) a legalsó tárcsáknál megfordulhat az olajáramlás
- a melegpont helye a rosszabbul hűlő alsó tárcsák felé tolódhat



▪ kis olaj sebességeknél (ON.. hűtés):

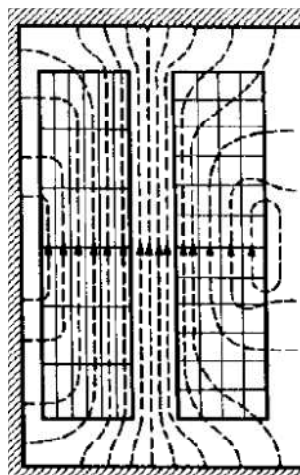
- a Richardson szám határozza meg az áramlás eloszlását
- a belépéstől távolabb levő tárcsákhoz nem jut el az olaj
- a legfelső tárcsa lényegesen melegebb lehet

A melegpont helye terhelés és hűtési állapot függő!



Melegponti tényező és melegpont helyének meghatározása

$$\vartheta_{\text{melegpont}} = \vartheta_{\text{környezet}} + \Delta\vartheta_{\text{felső_olaj_tekercsben}} + \textcircled{H} \cdot gr$$



➤ Szórási kép

- tekercs tetején és alján jelentős **radiális szórt tér**
- tekercs nagyobb részén **axiális szórt tér**



térben változó
szórasi veszteség

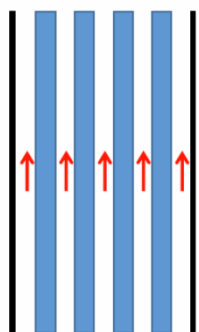
➤ Felfelé növekvő olaj hőmérséklet

- olaj sűrűsége, viszkozitása változik
- tekercs fajlagos ellenállása változik

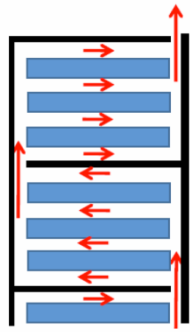


térben változó
áramlási és hűtési
viszonyok

veszteség
viszonyok változnak



axiális hűtés



cikk-cakk hűtés

H meghatározható:

- közvetlen melegpont méréssel (bizonytalanságokat lásd korábban)
- veszteség eloszlást, áramlási és hőátadási folyamatokat is figyelembe vevő számítással.

Melegponti tényező és melegpont helyének meghatározása

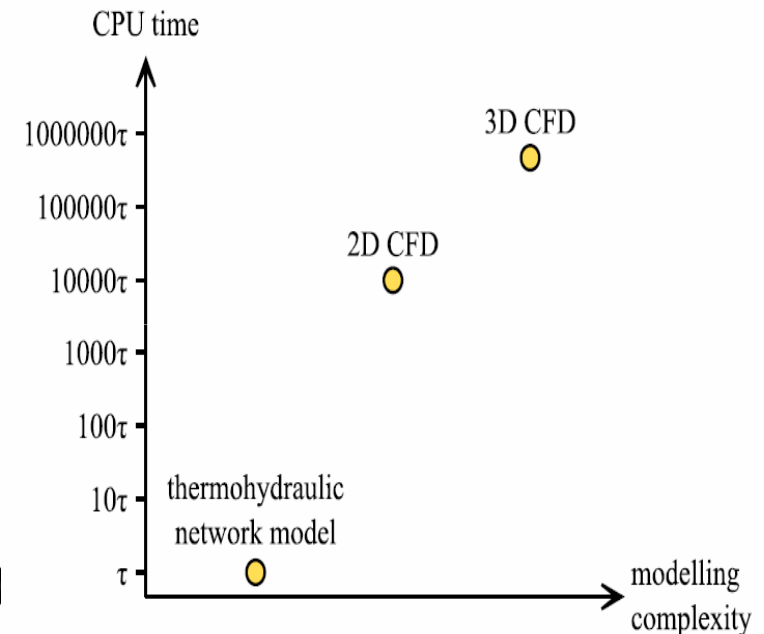


Veszteség eloszlás meghatározása véges elemes
mágneses tér számítással

+

- Tapasztalati összefüggések, tényezők az áramlási és hőátviteli jelenségek figyelembevételére
- IEC 60076-7 által javasolt érték használata
- Bonyolult számítási modellek térhódítása:

- **Computational Fluid Dynamics (CFD)**
 - Az áramlási és hő átviteli törvényeket differenciál egyenletrendszerrel írja le
 - Állandósult állapotra,
 - Eseti jelleggel
- **Thermal Hydraulic Network Model (THNM)**
 - Egyszerű algebrai egyenletekkel, részletes vizsgálatokon alapuló vagy tapasztalati tényezőkkel dolgozik.
 - Állandósult és tranziens állapotra
 - Tervezésre



Nagyhőállóságú szigetelések tapasztalatai

➤ Összehasonlító öregedés vizsgálatok (150 Cfokon, több hónapig)

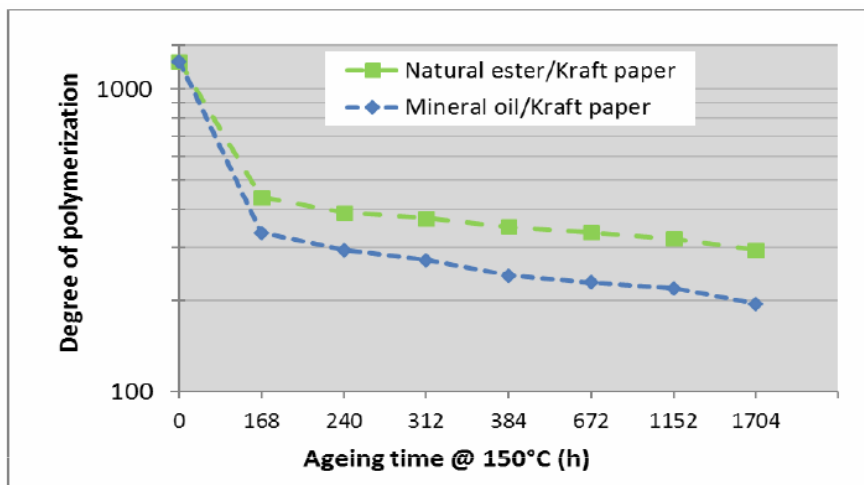


Figure 2: Evolution of degree of polymerization versus ageing time at 150 °C

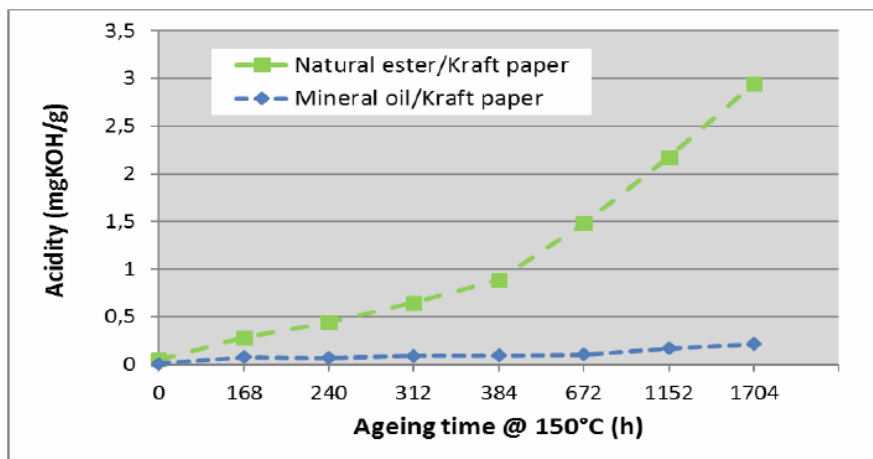


Figure 3: Evolution of oil acidity versus ageing time at 150 °C

- az észter elvonja a nedves-séget a papírból, ezzel lassítja annak öregedését.
- az észter savassága jóval nagyobb, mint az ásványi olajé
- „úgy tűnik, hogy” az észterben keletkező nagy molekulájú savak nem támadják meg a cellulóz szigetelést

Nagyhőállóságú szigetelések tapasztalatai



➤ Költség és tömeg összehasonlítás

	Option 1: Conventional	Option 2: Semi Hybrid	Option 3: Mixed Hybrid	Option 4: Full Hybrid	Option 5: High Temperature	Option 6: High Temperature
T°C: Ambient / oil / winding (hot spot)	40 / 60 / 65 (78)	40 / 60 / 75 (90)	40 / 60 / 65 (100)	40 / 60 / 105 (125)	40 / 90 / 105 (125)	40 / 90 / 95 (110)
Conductor insulation	Kraft paper	TUP	Material ≥ 155 °C & Kraft paper	Material ≥ 155 °C	Material ≥ 155 °C	TUP
Solid insulation (e. g. cylinders, strips)	Pressboard	Pressboard	Material ≥ 155 °C & Pressboard	Material ≥ 155 °C & Pressboard	Material ≥ 155 °C	Pressboard
Liquids	Mineral oil	Mineral oil	Mineral oil	Mineral oil	Natural ester	Natural ester
Weight 80 & 515 MVA	100 %	98 %	97 %	96 %	93 %	95 %
Costs 80 & 515 MVA	100 %	98 %	100 %	98 %	118 %	102 %

Kompaktabb, könnyebb, de drágább

Egyéb előnyök:

- alacsonyabb szállítási költség
- alacsonyabb biztosítási költség
- biológiai lebomlás
- fokozott tűzvédelem

Nagyhőállóságú szigetelések tapasztalatai



Smart solutions.
Strong relationships.

➤ Helyettesíthető az olaj észterrel?

- Összehasonlító mérések 400/230 kV-os, 200 MVA ODAF, 120 MVA ONAN transzformátoron

- ODAF

Parameter	Mineral oil	Natural ester	Synthetic ester
Top oil rise (p.u.)	1	0.88	0.98
Average winding gradient HV (p.u.)	1	1.66	1.36
Average winding gradient LV (p.u.)	1	1.44	1.26
Average winding rise HV (p.u.)	1	1.038	1.039
Average winding rise LV (p.u.)	1	1.075	1.064
Hot spot rise HV (p.u.)	1	1.012	1.058
Hot spot rise LV (p.u.)	1	1.097	1.15

„ODAF-ban nincs jelentős különbség, mert az olaj melegedés és a tekercs gradiens többnyire ellensúlyozza egymást.” ???

- ONAN

Parameter	Mineral oil @ 120 MVA	Natural ester @ 77 MVA	Synthetic ester @ 86MVA
Top oil rise (p.u.)	1	0.91	0.82
Average winding gradient HV (p.u.)	1	3.26	3.13
Average winding gradient LV (p.u.)	1	1.79	1.57
Average winding rise HV (p.u.)	1	1.017	0.92
Average winding rise LV (p.u.)	1	1.041	0.92
Hot spot rise HV (p.u.)	1	1.002	0.86
Hot spot rise LV (p.u.)	1	1.007	0.86

Itt sokkal rosszabb az észteres trafók terhelhetősége.

Észterre való áttérés előtt javasolt a terv felülvizsgálata!



Nagyhőállóságú szigetelések tapasztalatai



➤ Hideg indítás kérdése

- 15/20 MVA, 5.9 / 29 kW veszteségű 1 fázisú autótranszformátor mérései Midel 7131 töltéssel
 - a) -50 Cfokos környezet, indítás 40%-os terheléssel
 - felső tekercsolaj hőmérséklet azonnal emelkedik
 - 1.5 óra után indult meg a tekercsben az áramlás (alsó tekercsolaj hőmérséklet változott),
 - **3.5 óra után kezdett változni a felső olajhőmérséklet a szekrényben, amikor a tekercsből kilépő olaj már kb. 20 K-t melegedett!**
 - A radiátorokban 88 óra múlva sem indult be áramlás!
 - b) -40 Cfokos környezet, indítás 100% terheléssel
 - tekercs melegponti hőmérséklete azonnal emelkedik, felső tekercsolaj kis késéssel követi, tekercsen kívüli hőmérsékletek nem változnak
 - 14 óra után ugrásszerűen indul meg az áramlás a 3 radiátor közül egyben (45 K/h emelkedés az alsó csonknál!), majd 75 perc késéssel egy másikban. A harmadik radiátor nem reagál!
A fedél alatti olaj hőmérséklete > 120 Cfok!

Magyarországon ezek az extrém alacsony környezeti hőmérsékletek nem jellemzőek, de -25 Cfokos környezet esetén is tanácsos kikérni a gyártó tanácsát az indításra vonatkozóan!

Összefoglalás



- A közvetett tekercs melegponti hőmérséklet mérés bizonytalansága nagy.
- A közvetlen tekercs melegpont mérés különösen javasolt
 - dinamikus túlterhelések esetén
 - élettartam számításhoz
 - nagy viszkozitású szigetelő folyadék alkalmazása esetén
- A melegpont érzékelő helyét célszerű a veszteség, folyadék és hőáramlási viszonyokat egyaránt figyelembe vevő számítással meghatározni.
- A melegponti melegedés számításához használt melegpont tényezőt célszerű közvetlen melegpont méréssel vagy a veszteség, folyadék és hőáramlási viszonyokat egyaránt figyelembe vevő számítással meghatározni.
- Ásványi olajjal tervezett transzformátor észterrel való feltöltése előtt a gyártó véleményét szükséges kikérni.
- Nagy viszkozitású folyadékkal töltött transzformátorok hideg indításáról célszerű kikérni a gyártó tanácsát.