

dr. Nádor Gábor

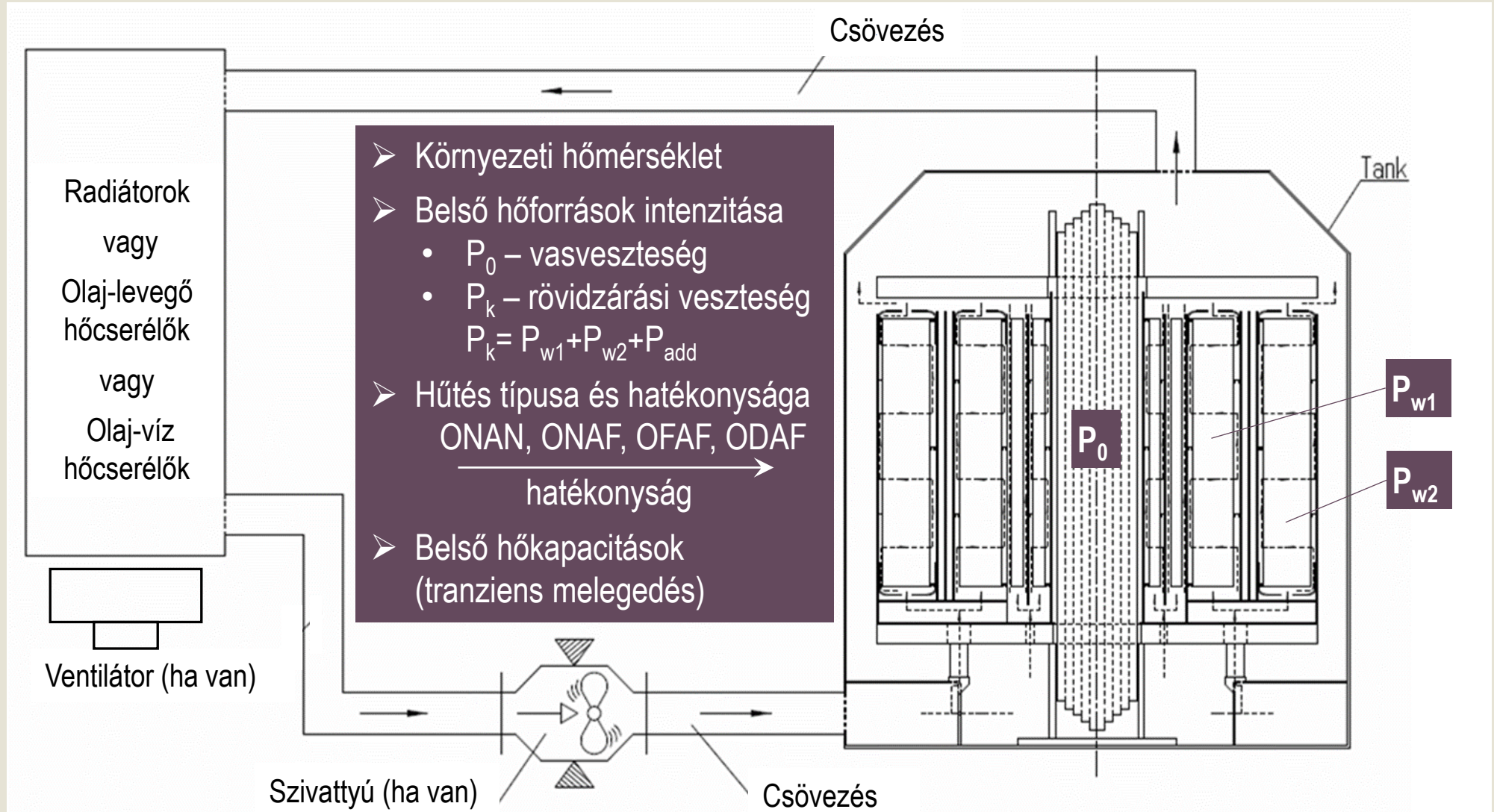
Nagytranszformátorok tranziens melegedésének előrejelzése

GANZ Transzformátor- és Villamos Forgógépgyártó Kft.
MEE Vándorgyűlés 2023

Tartalom

- **A transzformátor hőállapotát meghatározó tényezők**
- **A hőállapot ismeretének jelentősége**
- **Milyen lehetőségeket nyújt a hőmérséklet előrejelzése?**
- **Melegedési modell IEC 60076-7 szabvány szerint**
- **A modell paraméterek meghatározása**
- **Mérési eredmények**
- **Javaslatok, lehetőségek**

A hőállapotot meghatározó tényezők



A hőállapot ismeretének jelentősége

Olajhőmérséklet

A magas olajhőmérséklet a transzformátor tömítéseinek és tartozékainak tönkremenetelét okozhatja.

Tekercs melegpont

➤ Olaj-papír szigetelésű transzformátorok élettartamát a cellulóz alapú szigetelés öregedése határozza meg. Az öregedés sebessége nátron-cellulóz papír esetén 6°C-onként kétszereződik.

➤ Buborék képződés megindulása

- 0.5% papír nedvesség tartalomnál $\geq 200^\circ\text{C}$
- 2.0% papír nedvesség tartalomnál $\geq 140^\circ\text{C}$

$$V = 2^{\left(\frac{\theta_h - 98}{6}\right)}$$

A nagyobb relatív permittivitású olaj ($\mu_{\text{olaj}} = 2,2$) rányomja a villamos teret a gőz ($\mu_{\text{gőz}} = 1$) buborékra. A buborékban részleges kisülés indul, mely a buborék méretét növelve egyre nagyobb térrészre terjed ki, s végül átütéshez vezethet.

Vasmag hőmérséklete

Olajjal és cellulóz alapú szigetelő elemekkel érintkezik. Lehetséges következményeket lásd tekercs melegpontnál!

A transzformátor tartós, megbízható működése a hőmérséklet korlátok betartását igényli.

Milyen lehetőségeket nyújt a hőmérséklet előrejelzése?

➤ Tervezett rövid idejű túlterhelés

- megengedhető időtartam meghatározása
- élettartamra gyakorolt hatás meghatározása

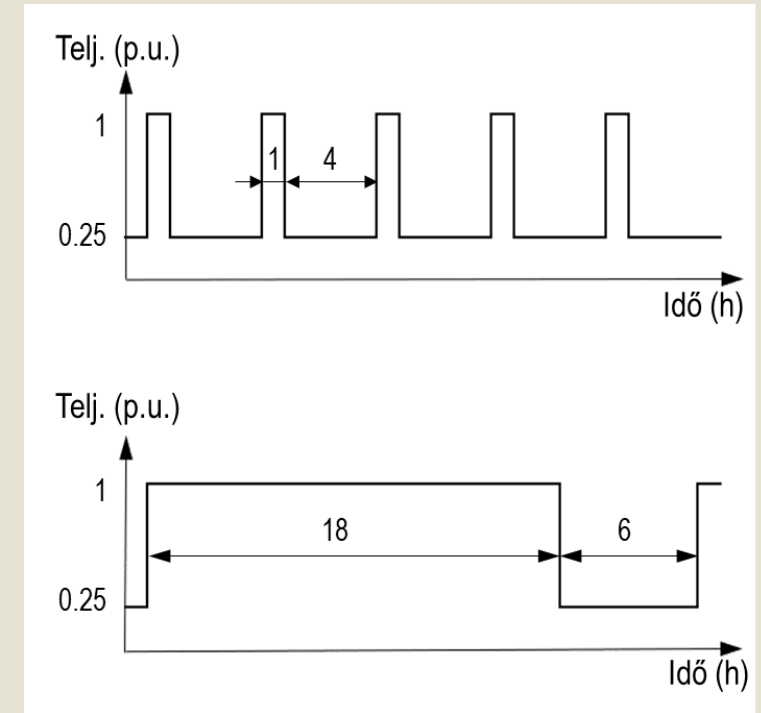
➤ Tartós vagy ciklikus terhelés

- megengedhető terhelés meghatározása
- élettartamra gyakorolt hatás meghatározása

➤ Megelőző (preventív) hűtésvezérlés

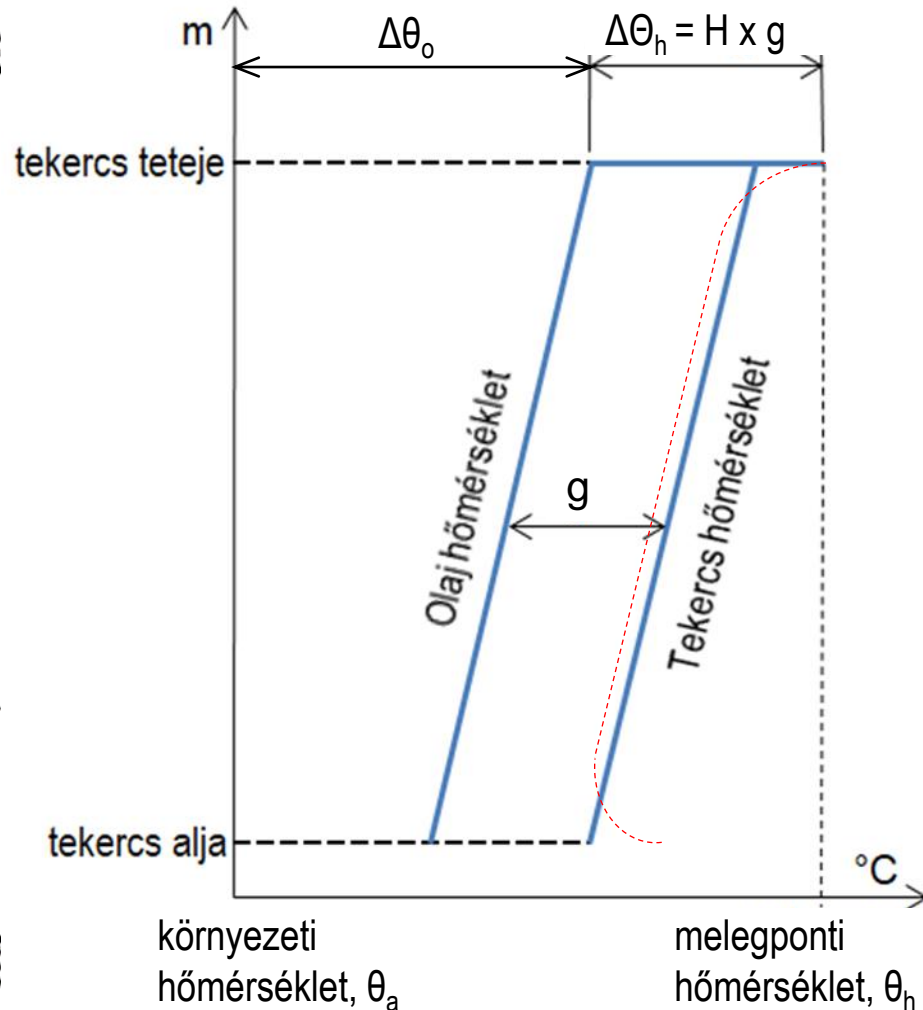
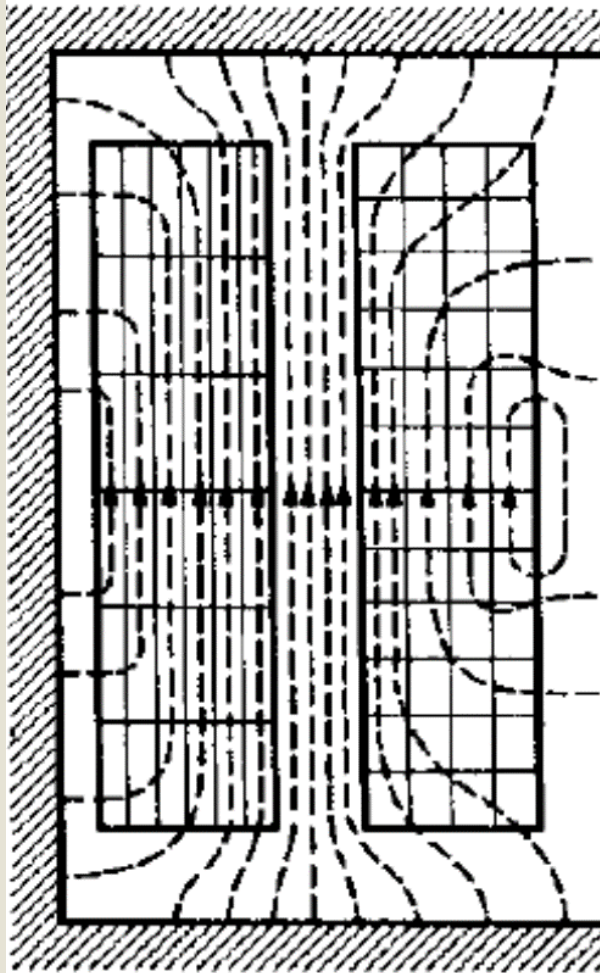
- ha a pillanatnyi terhelés alapján jelentős hőmérséklet emelkedés várható, akkor ennek kialakulása előtt bekapcsol az intenzívebb hűtés
- a túlterhelés megengedhető időtartama meghosszabbítható vagy
- a túlterhelés élettartam rövidítő hatása csökkenthető

➤ Digitális iker megoldás terjedése



A villamosenergia-rendszer átalakulásával, az energiaáramlás nagyságának és irányának hektikus változásaival várhatóan előtérbe kerül a fenti lehetőségek kihasználása.

Melegedési modell IEC 60076-7 szabvány szerint



Feltételezve, hogy

- névleges terhelésnél ismerjük:
 - az olaj melegedését a tekercs tetejénél ($\Delta\theta_{or}$)
 - a tekercs-olaj gradienst (g_r)
 - a rövidzárási és üresjárási veszteségek arányát

$$R = \frac{P_{k,r}}{P_0}$$

- ismert a H melegponti tényező

Tetszőleges K-szoros terhelésre:

$$\theta_o = \theta_a + \Delta\theta_{or} \times \left(\frac{1 + R \times K^x}{1 + R} \right)$$

$$\theta_h = \theta_o + \underbrace{H \times g_r \times K^y}_{\Delta\theta_h}$$

Az olaj melegedés az összveszteség x-edik, a tekercs-olaj gradiens a terhelés y-adik hatványával arányos. $x = ?$, $y = ?$

Tranziens melegedési modell

A szabvány a tranziens folyamatokat egyszerű két időállandós modellel írja le.

$$\theta_o(t) = \theta_a + \Delta\theta_{oi} + \left\{ \Delta\theta_{or} \times \left[\frac{1 + R \times K^2}{1 + R} \right]^x - \Delta\theta_{oi} \right\} \times \left(1 - e^{-t/(k_{11} \times \tau_o)} \right)$$

ahol $\Delta\theta_{oi}$ – a kezdeti olajmelegedés a tekercs tetejénél

τ_o – az olaj melegedésére jellemző időállandó

k_{11} – az olaj viszkozitásának hőmérséklet-függését veszi figyelembe

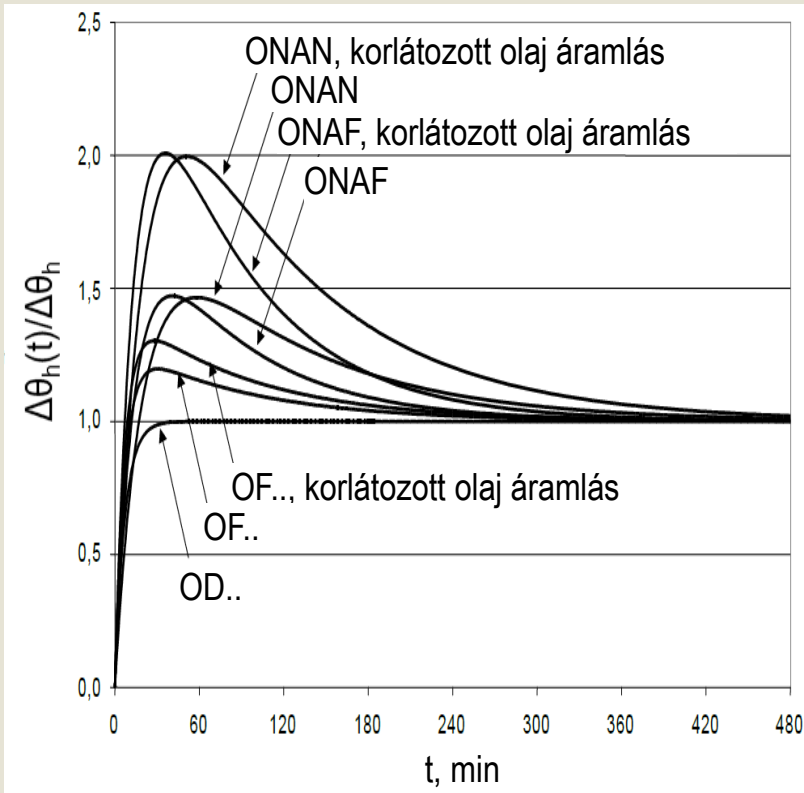
$$\theta_h(t) = \theta_o(t) + \theta_h(t) = \theta_o(t) + (\theta_{h1}(t) - \theta_{h2}(t))$$

ahol
$$\Delta\theta_{h1}(t) = \Delta\theta_{h1i} + \{k_{21} H g_r K^y - \Delta\theta_{h1i}\} \times \left(1 - e^{-t/(k_{22} \times \tau_w)} \right)$$

Ennyi lenne a melegponti gradiens, ha az olaj termikus és áramlási jellemzőinek nem változnának. Hirtelen terhelés változáskor ez hőmérséklet túllövést okozhat.

$$\Delta\theta_{h2}(t) = \Delta\theta_{h2i} + \{k_{21} - 1\} H g_r K^y - \Delta\theta_{h2i} \times \left(1 - e^{-t/(\tau_o/k_{22})} \right)$$

Ez a tag veszi figyelembe, hogy a melegpont hőmérsékletének emelkedésekor az olaj jellemzői a hűtés szempontjából kedvezően változnak.



$$x, y, k_{11} \times \tau_o, k_{21}, k_{22} \text{ és } \tau_w = ?$$

A modell paraméterek meghatározása

IEC 60076-7 által (mérés hiányában) javasolt értékek

Modell paraméter	Hűtés típusa						
	ONAN korlátozott olajáramlás	ONAN	ONAF korlátozott olajáramlás	ONAF	OF korlátozott olajáramlás	OF	OD
Olaj kitevő, x	0,8	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0
Tekercs kitevő, y	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	2,0
k_{11}	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0
k_{21}	3,0	2,0	3,0	2,0	1,45	1,3	1,0
k_{22}	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,0	1,0
Olaj időállandó, τ_o (min)	210	210	150	150	90	90	90
Tekercs időállandó, τ_w (min)	10	10	7	7	7	7	7

- A tényleges paraméterek a transzformátor nagyságától, kialakításától, veszteség viszonyaitól, a hűtésrendszer hatékonyságától, stb. függenek.
- A táblázatban általánosan megadott paraméter értékek nagyon pontatlan eredményekre vezethetnek.
- A tekercs és olaj időállandók a szabványos melegedésmérés eredményei és tervezési adatok alapján számíthatók:

$$\tau_w = \frac{m_w \times c_w \times g}{60 \times P_w} \quad \text{illetve} \quad \tau_o = \frac{C_o \times \Delta\theta_o}{60 \times P}$$

ahol

$$C_o = \underbrace{c_w \times m_w}_{\text{tekercsek}} + \underbrace{c_{FE} \times m_{FE}}_{\text{vasmag}} + \underbrace{c_T \times m_T}_{\text{vasszerkezet}} + \underbrace{k_o \times c_o \times m_o}_{\text{olaj}}$$

A modell paraméterek meghatározása méréssel

IEC 60076-7 által javasolt mérési módszert követtük:

- a) olaj időálló korrekciós tényezője, k_{11}
 - Olajmelegedés mérése ($\Delta t = 5$ min)
 - **környezeti hőmérsékletről (hideg állapotból) indulva**
 - névleges veszteségeket betáplálva
 - névleges hűtési feltételeket fenntartva
 - Mért felső olajmelegedések relatív értékének meghatározása az állandósult olajmelegedéshez viszonyítva:

$$Mf_{1j} = \frac{M\theta_{oj} - M\theta_{aj}}{\Delta\theta_{or}}$$

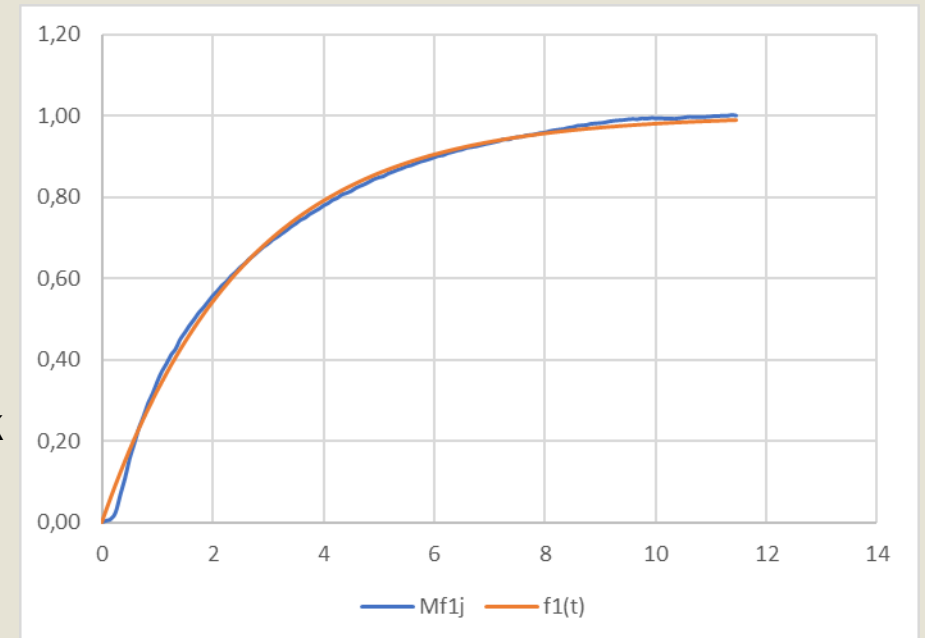
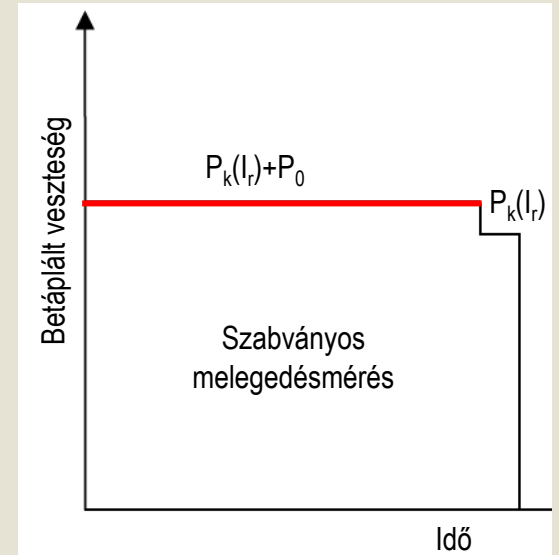
- Feltételezve az exponenciális felfutást,

$$f_1(t) = (1 - e^{(-t)/(k_{11} \times \tau_o)})$$

kereső függvény felírása.

- k_{11} keresése a $f_1(t)$ függvény a mért Mf_1 adatok közötti eltérések négyzetösszegének minimalizálásával.

$$\text{minimum } \sum_{j=1}^N [f_1(j\Delta t) - Mf_{1j}]^2$$



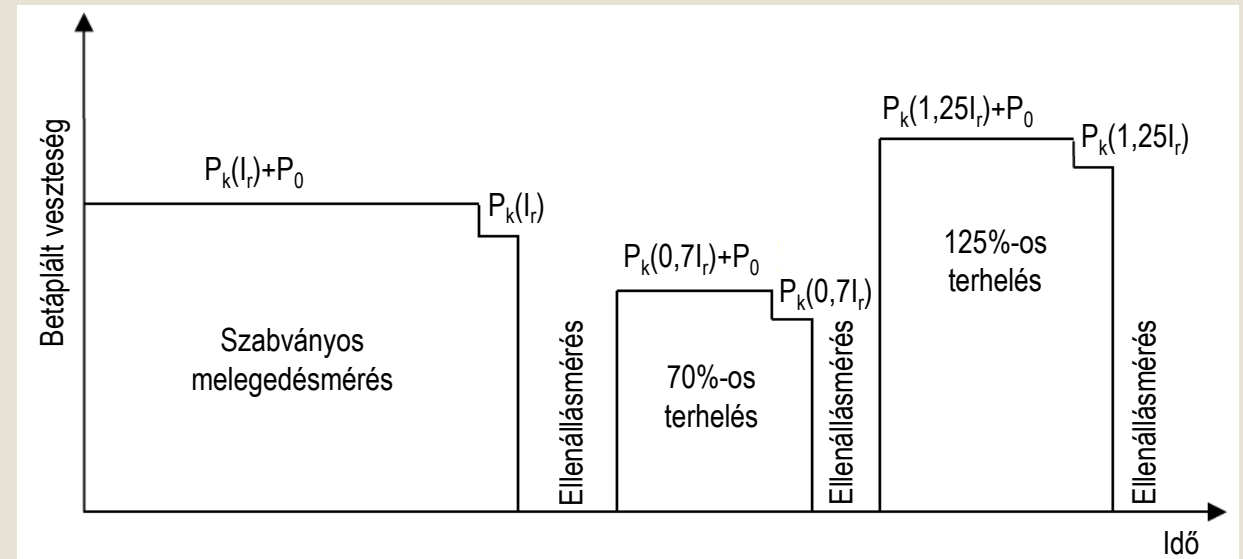
A modell paraméterek meghatározása méréssel

b) x olaj és y tekercs kitevők

- **Több lépcsős melegedésmérés** (normál, 70%, 125% terhelésnél)
- $P_k(I)+P_0$ veszteségű táplálásoknál olajmelegedés mérése x tényező meghatározásához
- $P_k(I)$ veszteségű táplálásoknál tekercsmelegedés mérése y tényező meghatározásához
- Melegedések terhelésfüggésének ábrázolása log-log rendszerben
- Egyenes illesztése a három mért pontra a legkisebb négyzetek módszerével.
- A egyenes meredeksége adja x, illetve y paramétert.

c) **k_{21} és k_{22} paraméterek csak közvetlen melegpont érzékelőkkel ellátott transzformátoron mérhetők ki.**

Ilyen mérés elvégzésére egyelőre nem volt lehetőségünk.



Oil exponent „X” according to IEC 60076-7 (2018) Annex „G”

Temperature rise test at 100%:

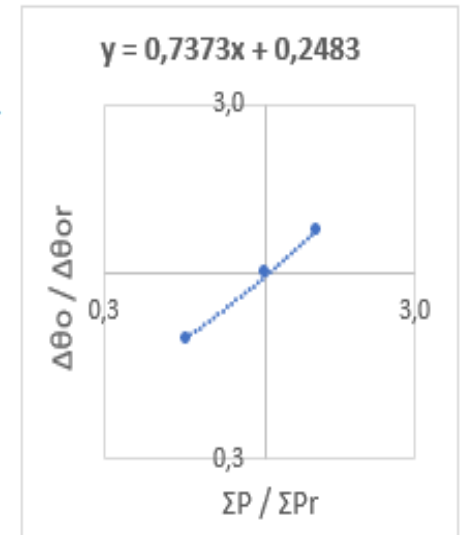
ΣP_{100}	383,89 kW	Total loss	$\Sigma P / \Sigma P_r$	$\Delta\theta_o / \Delta\theta_{or}$
$\Delta\theta_{o100}$	53,49 K	Oil temp. Rise	0,5533	0,6489
			1,0000	1,0000
			1,4568	1,3152

Temperature rise test at 70%:

ΣP_{70}	212,41 kW	Total loss		
$\Delta\theta_{o70}$	34,71 K	Oil temp. rise		
			X = 0,7373	

Temperature rise test at 125%:

ΣP_{125}	559,25 kW	Total loss		
$\Delta\theta_{o125}$	70,35 K	Oil temp. rise		



Eredmények

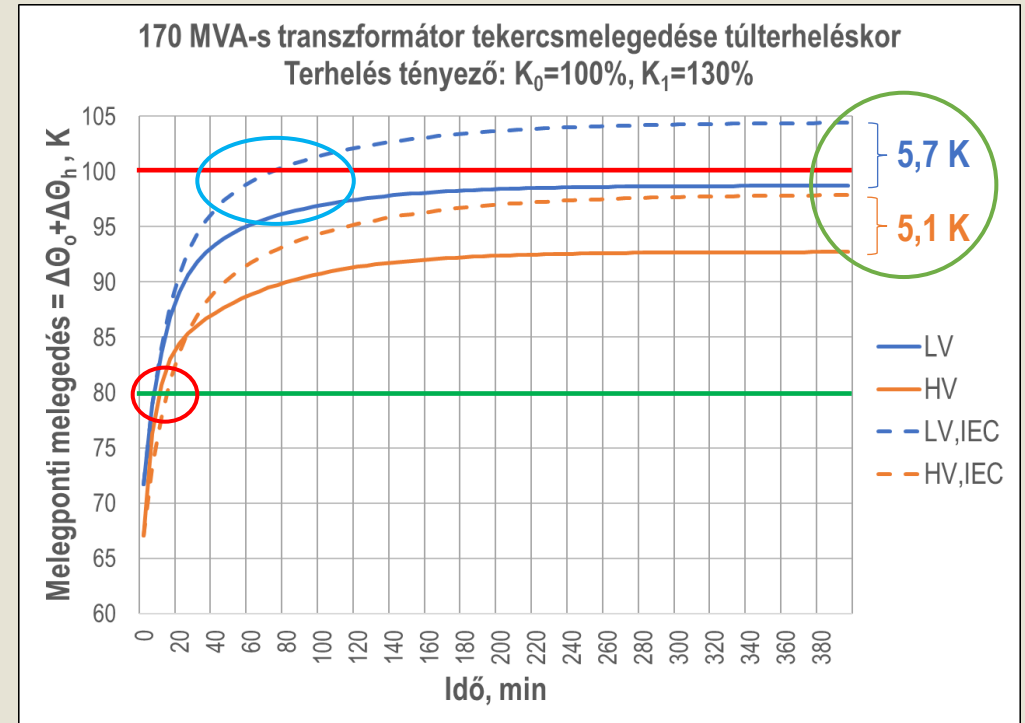
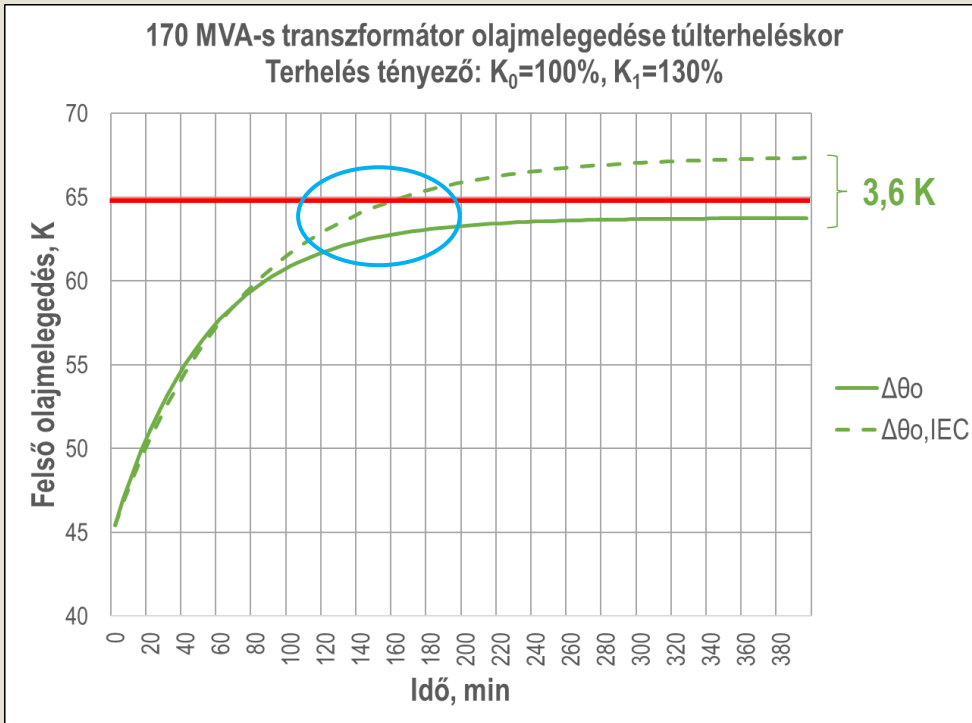
	Teljesítmény	Hűtés	k_{11}	x	y_{LV}	y_{HV}	$\tau_o, \text{ min}$	$\tau_{w,LV}, \text{ min}$	$\tau_{w,HV}, \text{ min}$
T1	120 MVA	ONAN	0,653	0,737	1,212	1,268	235	7,14	4,18
	170 MVA	ONAF	0,546	0,686	1,083	1,106	99	5,46	2,98
T2	40 MVA	ONAF	0,617				206	7,44	3,15
IEC 60076-7	ONAN	0,5	0,8	1,3	1,3	210	10		
	ONAF							7	

$$\tau = \frac{c \times m \times \Delta\theta}{P}$$

1. A paraméterek a szabványban megadottaktól jelentősen eltérhetnek.
2. Intenzívebb hűtés esetén a időállandók csökkennek.
3. A tekercsek időállandói tekercsenként jelentősen eltérőek lehetnek.
A kisebb időállandójú tekercs a rövid idejű túlterhelésekre érzékenyebb.
4. A kis veszteségű transzformátorok termikus időállandói általában nagyobbak.

	Teljesítmény	Vasmag anyaga	B (T)	J (A/mm ²)
T1	170 MVA	0,8 W/kg	1,75	3,5
T2	40 MVA	0,8 W/kg	1,54	2,6

Eredmények



A vizsgált esetben IEC tényezőkkel kapható eredményekhez képest:

- Jelentősen kisebb állandósult melegedések >>> kisebb élettartam-fogyási sebesség ($5,7\text{ K} \gg V/V_{IEC} = 0,52$)
- Jelentősen hosszabb túlterhelhetőség adódik adott hőmérséklet korlát figyelembevételével.
- De, HV tekercs esetén a 80 K-es hőmérséklet korláttal rövidebb idejű túlterhelhetőséget kapunk!

A tényleges terhelhetőség megbízható értékelése csak a transzformátor specifikus paraméterek ismeretében lehetséges.

Javaslatok, lehetőségek

- **Jellemzően tartós terhelési szakaszokkal üzemelő, rövid idejű túlterheléseknek nem kitett** transzformátorok esetén az időállandóknak kevésbé van szerepe, de x és y kitevők ismerete elengedhetetlen a megengedhető terhelés és az élettartam-fogyás megbízható értékeléséhez.
- **Ciklikus, vagy hektikusan változó terhelés** esetén az olaj és tekercs időállandók, az x és y kitevők és a k_{11} , k_{21} és k_{22} tényezők transzformátor specifikus ismerete egyaránt szükséges a terhelhetőség megengedhető időtartamának, illetve az élettartam-fogyás megbízható számításához.
- A terhelésfüggő átszámításokhoz szükséges tényezők IEC 60076-7 által mérés hiányában javasolt, bizonytalan értékelést eredményező értékeinek használata helyett javasolt:
 1. Tényezők értékének méréssel történő meghatározása

Mérés típusa	Meghatározható paraméter	
	Nincs DHS	Van DHS
Normál melegedés	τ_o, τ_w	τ_o, τ_w
Elnyújtott melegedés	τ_o, τ_w, k_{11}	τ_o, τ_w, k_{11}
Melegedés 3 terhelésállapotban	$\tau_o, \tau_w, k_{11}, x, y$	$\tau_o, \tau_w, k_{11}, x, y, k_{21}, k_{22}$

↓
Idő- és energia-
szükséglet,
költség növekszik

2. Öntanuló állapotfigyelő rendszer

Telepítéskor elég a tényezők IEC által ajánlott (vagy más tapasztalati) értékeit megadni, s a rendszer folyamatosan pontosítja azokat.

Köszönöm a figyelmet

gabor.nador@ganzelectric.com



TRADITION FOR INNOVATION

