

Fóliafegyverzetű kondenzátorok nonlinearitásának vizsgálata

ETO 621.319.4:621.391.832.4

Roncsolásmentes vizsgálati módszerként, passzív alkatrészeknél, az utóbbi időben a nonlinearitási vizsgálat is előtérbe került a következő okok miatt:

— tapasztalati megfigyelések támasztják alá, hogy az átlagosnál magasabb nonlinearitási szinttel rendelkező kondenzátoroknál a szerkezeti elemek hiányosságaival lehet számolni,

— a nagy nonlinearitási tényezővel rendelkező kondenzátorok, mint nonlineáris elemek, felharmonikusok keletkezésének forrásai lehetnek és mint ilyenek a felharmonikus tartalomra érzékeny áramkörök működését közvetlenül befolyásolhatják.

Annak érdekében, hogy a nonlinearitási vizsgálatok kellő hatékonyságúak legyenek, mindenekelőtt az optimális vizsgálati körülmények kialakításának lehetőségeit vizsgáltuk, valamint fóliafegyverzetű, poliészter dielektrikumú kondenzátorok nonlineáris tulajdonságainak tanulmányozását végeztük el.

1. Mérési eljárás kondenzátorok nonlinearitásának meghatározására

A kondenzátorok nonlineáris tulajdonsága egyes kondenzátor szerkezeti elemek, pl. kontaktus, fegyverzet stb. omhos ellenállásának feszültség-függőséggel hozható kapcsolatba.

A szerkezeti elemek ellenállásának feszültség-függősége következtében a kondenzátor feszültség-áram karakterisztikája nonlineáris jellegűvé válik.

Méréstechnikai szempontból nehézséget jelent a kondenzátor nonlinearitásának közvetlen meghatározása, ezért közvetett eljárások a szokásosak.

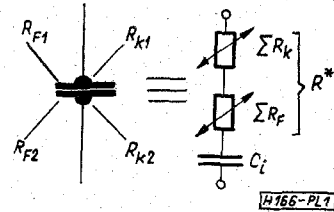
Egyik használatos mérési eljárás a kondenzátorban keletkező 3. harmonikus amplitúdójának a mérésén alapul.

1.1 A szerkezeti elemek helyettesítő kapcsolása

A nonlinearitás-mérés szempontjából a kondenzátor villamos helyettesítő kapcsolása, figyelembe véve, hogy a mérés váltakozó feszültséggel történik, az 1. ábra szerinti, ahol C_i az ideális kondenzátor, R_K a feszültség-függőséget mutató kontaktus-ellenállást és R_F a kondenzátor fegyverzeteinek feszültség-függőségét reprezentálja.

Az R_K kontaktus ellenállás, amely a fegyverzet és a kivezetők közötti csatlakozó helyeket veszi figyelembe, főképpen a szűkületi ellenállás, valamint az érintkezési helyeket szennyező idegen rétegek következtében rendelkezik feszültség-függő tulajdonságokkal.

Fóliafegyverzetű kondenzátoroknál a fegyverzet fémes vezetése miatt a fegyverzetek feszültség-függő



1. ábra. A kondenzátor feszültségfüggő elemeinek helyettesítő ábrája

sége nem számottevő, ekkor $R^* = R_K$. Gőzölt fegyverzetű kondenzátoroknál a fegyverzet feszültségfüggő tulajdonságokkal rendelkezhet, ezért ilyen esetekben R_F , elhagyása nem minden esetben lehetséges, ekkor $R^* = R_K + R_F$, az ábrának megfelelően.

1.2 Felharmonikusok keletkezése a nonlineáris V—I karakterisztika következtében

Valamely R^* feszültség-függő ellenállás ellenállásértékének a feszültségtől való függése a következő alakban fejezhető ki

$$R^* = R_0(1 + b_1 U + b_2 U^2 + b_3 U^3 + \dots)$$

A polaritás függetlenség miatt ez a függvény $+U$ és $-U$ értékekre egyaránt igaz kell, hogy legyen, ezért $b_1 = b_3 = b_5 \dots = 0$, így

$$R^* = R_0(1 + b_2 U^2 + b_4 U^4 + \dots) \quad (1)$$

Az első két tag figyelembevételével közelítőleg

$$R^* = R_0(1 + b_2 U^2) \quad (2)$$

Tapasztalat szerint, passzív alkatrészek esetében b_2 előjele negatívnak adódik.

Az ellenállás feszültség-függőségének következtében a feszültségfüggő ellenállás vezetőképessége és ennek következtében feszültség-áram karakterisztikája nonlineáris.

A (2) egyenlet figyelembevételével a vezetőképességnek a feszültségtől való függése, sorfejtés és elhanyagolások után, az alábbi összefüggés segítségével adható meg

$$\sigma^* = \frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_0} \frac{1}{1 + b_2 U^2} \approx \sigma_0(1 - b_2 U^2) \quad (3)$$

U feszültség hatására R^* -on keresztülfolyó áram értéke

$$I = a_0(U - b_2 U^3) \quad (4)$$

Feszültségfüggő ellenállás kapcsolása tiszta szinuszos váltakozó feszültséget adva, némszínuszos lefolyású, torzított áramgörbe adódik, amely felharmonikusok keletkezésére utal.

Ennek kimutatása céljából $U_G = U_{G0} \sin \omega t$, szinuszosan váltakozó generátorfeszültséget alapul véve, a (4) egyenletbe történő helyettesítés által adódik

$$I = a_0 U_{G0} \sin \omega t - \sigma_0 b_2 U_{G0}^3 \sin^3 \omega t \quad (5)$$

Ismert trigonometriai összefüggések figyelembevételével, (5) a következő alakban írható

$$I = a_0 U_0 \left(1 - \frac{3b_2 U_{G0}^2}{4} \right) \sin \omega t + \frac{\sigma_0 b_2 U_{G0}^3}{4} \sin 3\omega t \quad (6)$$

Mivel $b_2 U_{G0}^2 \ll 1$, ezért a (6) összefüggés egyszerűsítése által kapjuk, hogy

$$I = a_0 U_{G0} \sin \omega t + \frac{a_0 b_2 U_{G0}^3}{4} \sin 3\omega t \quad (7)$$

A (7) kifejezés második tagja 3. harmonikus fellépésére utal, amelynek amplitúdója

$$U_3 = \frac{b_2 U_{G0}^3}{4} \quad (8)$$

A (7) összefüggés 3. harmonikusnál magasabb felharmonikusok fellépésére nem utal, aminek az az oka, hogy a (2) kifejezés csupán az (1) egyenlet első két tagját veszi figyelembe. További tagok figyelembe vétele esetén, további páratlan számú felharmonikusok fellépése is kimutatható, így például az első három tag figyelembevételkor az áramra nyert egyenletek 5ω körfrekvenciájú komponenseket is tartalmazni fognak, és a 3. harmonikus amplitúdóját ekkor (8) helyett az alábbi összefüggés adja meg

$$U_3 = \frac{1}{4} b_2 U_{G0}^3 + \frac{5}{16} b_4 U_{G0}^5 \quad (9)$$

Tapasztalati adatok alapján azonban a magasabb felharmonikusok amplitúdója rohamosan csökken, ezért kis U_{G0} értékek esetén már az 5. és magasabb felharmonikusok hatásai elhanyagolhatók, elegendő a 3. harmonikus mérése és amplitúdójának a (8) összefüggés szerint történő megadása [1].

A fentiekkel összhangban a kondenzátorra adott U_G szinuszosan váltakozó feszültség hatására a kondenzátorban keletkezett 3. harmonikus amplitúdója annál nagyobb, mennél inkább feszültségfüggő az R^* . Ezzel egyenértékű az a megállapítás, hogy a kondenzátorban keletkezett 3. harmonikus amplitúdója a kondenzátor nonlinearitásával arányos, ugyanis a (8) egyenlet a következő alakban írható

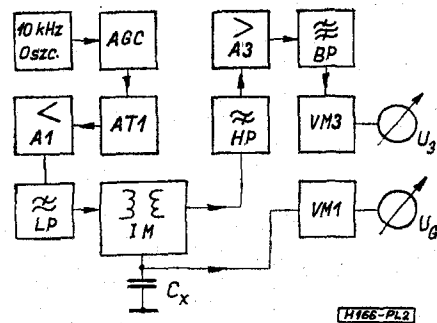
$$U_3 = \frac{1}{4} b_2 U_{G0}^3 = K'_N U_G^3 \quad (10)$$

ahol K'_N a kondenzátor nonlinearitásának mértékére jellemző.

2. Kísérleti rész

2.1 Az alkalmazott mérőberendezés

Vizsgálataink során a 3. harmonikus mérését Radiometer gyártmányú CLT-2 típusú műszerrel végeztük. A mérőberendezés egyszerűsített blokkvázlata a 2. ábrán látható. A 10 kHz-es szinuszosan váltakozó feszültséget egy LC oszcillátor állítja elő.



2. ábra. A CLT-2 műszer tömbvázlata

Az AGC amplitúdó szabályozó fokozaton és ATI osztón keresztül a minimális torzítású A1 teljesítmény erősítőbe jut a jel. A teljesítmény erősítő után LP aluláteresztő szűrőn keresztül jut tovább az IM impedancia illesztő fokozaton át a C_x vizsgálandó kondenzátorra. U_G -nek, a kondenzátorra jutó 10kHz-es feszültségnek, effektív értékét a VM1 csővoltmérő méri.

A vizsgált kondenzátorban keletkezett 3. harmonikus feszültség leválasztására ugyancsak az IM transzformátor szolgál, majd a HP felüláteresztő szűrő után a 30 kHz-es jel erősítését végzi az A3 erősítő fokozat, amelyet BP sávszűrő fokozat követ.

U_3 -nak, a 30 kHz-es jel effektív értékének, mérését a VM3 csővoltmérő végzi, amely lineáris és logaritmusos jellegű indikálást egyaránt lehetővé tesz.

A mérőtranszformátor különleges kialakítása és egyéb kapcsolási megoldások biztosítják a műszer mérőköri alkatrészeiben keletkező felharmonikusok kompenzálását.

2.2 Alkalmazásra kerülő fogalmak definíciói

2.2.1 A nonlinearitás mérőszámai

A mérőberendezés U_G és U_3 effektív értékét méri, így a (10) összefüggésben előforduló K'_N arányossági tényező helyett, K_N arányossági tényező használata előnyösebb, amelyet a továbbiakban nonlinearitási tényezőnek nevezünk. Mivel

$$U_{3\text{eff}} = K_N U_{G\text{eff}}^3 \quad \text{ezért} \quad K'_N \approx 2K_N \quad (11)$$

A K_N értéken kívül a nonlinearitás jellemzésére még további mérőszámok is használatosak, így a 3. harmonikus index [2]

$$3HI = -20 \log K_N \quad (12)$$

valamint a 3. harmonikus csillapítás [3]

$$3HCS = -20 \log \frac{U_{3\text{eff}}}{U_{G\text{eff}}} \quad (13)$$

A nonlinearitás (12), ill. (13) szerint történő megadása dB-ben történik.

2.2.2 A kondenzátortípusok nonlinearitási mutatói

Az egyes kondenzátortípusok esetében, nagyszámú mintán végzett mérések alapján, matematikai-statistikai módszerek segítségével a típusra jellemző mutatók határozhatók meg.

Egy kondenzátortípus, — általánosabb esetben, tétel — jellemző nonlinearitási mutatói a 3HCS szerinti eloszlásgörbe alapján határozhatók meg.

A 3. ábrán 1600 V-os, poliészter dielektrikumú kondenzátorok vizsgálata alkalmával kapott és Gauss-féle valószínűségi papíron ábrázolt 3HCS szerinti eloszlás látható, ahol $3HCS_{max}$ a típusnál megfigyelt maximális csillapítást, $3HCS_{tip}$ amely az eloszlás median értékének felel meg, ugyanakkor a típusra jellemző értéket jelenti.

Ha a vizsgálat célja szelektálás, úgy meg kell adni a szelektálás alapjául szolgáló csillapítási határértéket ($3HCS_{hat}$) is.

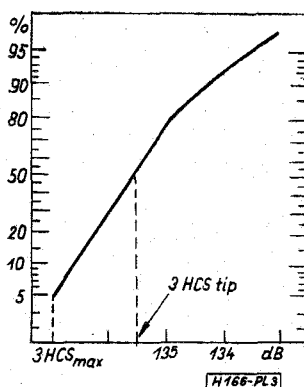
Egy konkrét kondenzátortípus esetében $3HCS_{hat}$ számszerű meghatározása, ha a potenciálisan hibás példányok eltávolítása a cél — tapasztalataink szerint — csak ugyanazon típus hosszúidejű élettartam vizsgálati eredményeinek egyidejű értékelésével válik lehetségessé.

2.3 Vizsgálati eredmények

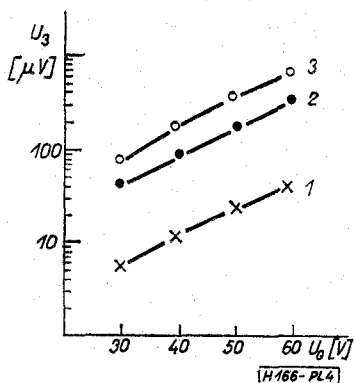
Vizsgálataink alkalmával első lépésként nem $3HCS_{hat}$ meghatározásra törekedtünk, hanem a következő összefüggések tanulmányozására szorítkoztunk:

— Azonos konstrukciós kivitelű, de különböző névleges feszültségre készült kondenzátortípusok nonlinearitási mutatói közötti eltérések vizsgálata,
— a tárolás körülményei, mint befolyásoló tényezők, hogyan befolyásolják a nonlinearis tulajdonságokat,

— a K_N nonlinearitási tényező U_G -től való függésének kérdése.



3. ábra. 1600 V-os kondenzátortétel eloszlásképe ($U_G = 30$ V)



4. ábra. A 3. harmonikus amplitúdójának U_G -től való függése

2.3.1 Azonos konstrukciós kivitelű 250 V és 1600 V-os típusok

A 4. ábrán két azonos konstrukciós kivitelű kondenzátortípus vizsgálati eredményeit tüntetjük fel. A vízszintes tengelyen a 10 kHz-es U_G feszültséget ábrázoltuk lineáris léptékben, a függőleges tengelyen pedig a kapott U_3 értéket adtuk meg logaritmus léptékben.

Az ábrán feltüntetett 1 görbe 22 nF-os, 1600 V-os típus, míg a 2 és 3 görbe 22 nF-os, 250 V-os típus átlagos $U_3 = f(U_G)$ függését mutatja.

Az eredményeket értékelve megállapítható, hogy azonos U_G feszültségek mellett az 1600 V-os típusnál közelítőleg egy nagyságrenddel alacsonyabb átlagos U_3 értékek adódtak.

A kondenzátorok kivitele, konstrukciós megoldása a 250 V és 1600 V-os típusoknál azonos; a fegyverzetek alumínium fóliából készültek, a dielektrikum poliészter fólia, a kivezetők villamos ellenállás hegesztéssel vannak a fegyverzetekhez rögzítve.

Az 1600 V-os típus kedvezőbb viselkedése, feltételezéseink szerint a megnövelt méretekkel (lásd 1. táblázat), így többek között a nagyobb kontaktus

1. táblázat

A vizsgált 22nF-os, fóliafegyverzetű, poliészter dielektrikumú kondenzátorok főbb jellemzői

Tétel sorszám	Mennyiség (db)	Névl. fesz. (V)	Dielektrikum vastagsága (μm)	Külső méretek	
				átmérő (mm)	hossz (mm)
1.	50	1600	40	14	31,5
2.	50	250	12	7	21,5
3-5.	20-20	250	12	7	21,5

felülettel, illetve a vastagabb dielektrikum zsugorodása által biztosított, nagyobb kontaktusnyomással hozható kapcsolatba.

2.3.2 Tételek közötti eltérések

A tételek közötti lehetséges eltérések tanulmányozása céljából, ugyanazon gyártó által előállított 22 nF, 250 V-os poliészter dielektrikumú kondenzátor tételek vizsgálati eredményeit összehasonlítva megállapítható, hogy az azonos típusú, de különböző gyártási szériából származó kondenzátor tételek között eltérések adódtak (4. ábra 2 és 3 görbe).

Jelen esetben a két tétel eltérő viselkedése nem magyarázható kizárólagosan a gyártás esetleges ingadozásával, ugyanis a 2. tételnél a gyártás és U_3 mérése között kb. $2 \cdot 10^4$ óra telt el, amely időszakasz alatt a tételt szobahőmérsékleten tároltuk (2 görbe).

A 3. tételt egy későbbi időpontban gyártották, mérése a gyártást követő közeli időszakaszban került sor (3 görbe).

A 2. táblázatban összefoglaltuk a 4. ábrán feltüntetett tételek $U_G = 30$ V és $U_G = 60$ V mellett nyert $3HCS_{max}$, $3HCS_{tip}$ és $3HCS_{min}$ értékeit. A táblázat alapján megállapítható, hogy a 2. tétel $3HCS_{tip}$ értékei 6...7 dB-el magasabbak voltak mint a 3. tétel esetében észlelt értékek.

2. táblázat

A 3. harmonikus csillapítás értékei

Tétel sorszám	$U_G=30\text{ V}$			$U_G=60\text{ V}$		
	max	tip	min	max	tip	min
1.	136,9	135,6	133,0	124,0	122,7	122,0 dB
2.	121,6	117,8	112,6	109,6	106,8	101,8 dB
3.	114,2	111,4	108,8	102,0	99,6	98,2 dB

2.3.3 Melegtárolás hatása

Feltételeztük, hogy melegtárolás hatására olyan folyamatok játszódnak le a kondenzátorokban, amelyek a nonlineáris tulajdonságok megváltozását okozhatják.

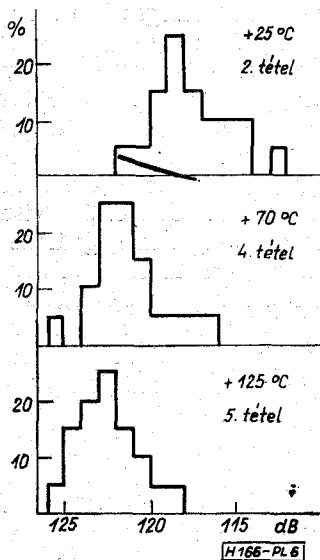
A melegtárolás hatására bekövetkező változások tanulmányozása céljából olyan, azonos gyártási szériából származó, tételeken végeztünk méréseket, amelyeket a mérések előtt +25 °C, +70 °C, illetve +125 °C környezeti hőmérsékleten 2·10⁴ órán keresztül tároltunk.

Az egyes tételek 3HCS szerinti százalékos előfordulási gyakoriságát az 5. ábra mutatja. A 2. tétel tárolása +25 °C-on történt (azonos a 4. ábrán szereplő 2. tétellel), a 4. tétel tárolása +70 °C-on, az 5. tétel pedig +125 °C-on történt. A meleg tárolásos vizsgálatok eredményei alapján megállapítható, hogy a szobahőmérsékleten tárolt tételhez viszonyítva a +70 °C és +125 °C hőmérsékleteken végzett 2·10⁴ órás tartós tárolás hatására a nonlineáris mutatók irreverzibilis javulása következett be.

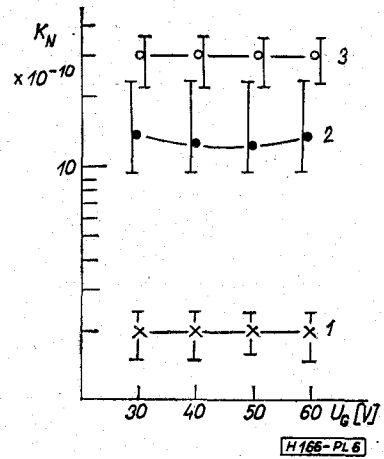
A jelenség magyarázataként feltételezhető, hogy a tartósan megemelt hőmérséklet hatására a poliészterfólia további zsugorodásának következtében fellépő mechanikai erők a fegyverzetek és a kivezetők közötti nyomóerőt növelték, így a kontaktus viszonyok kedvezőbbé válását eredményezték.

2.3.4 A nonlineáris tényező U_G -tól való függése

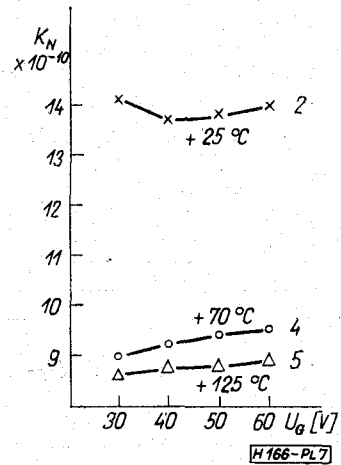
A nonlineáris tényező U_G -tól való függésének vizsgálata céljából a 4. ábra szerinti $U_3=f(U_G)$ függvények alapján a (11) összefüggés által meghatározott



5. ábra. Tartós melegtárolás után észlelt eloszlásképek



6. ábra. A nonlineáris tényező U_G -tól való függése; 1. és 3. tétel



7. ábra. A nonlineáris tényező U_G -tól való függése; 2., 4. és 5. tétel

K_N értékeket tüntettük fel a 10 kHz-es generátorfeszültség U_G , függvényében a 6. ábrán.

A közölt vizsgálati eredmények, valamint egyéb kondenzátor tételeken végzett vizsgálatok alapján arra lehet következtetni, hogy hegesztett kivezetőjű, fólia fegyverzetű, poliészter dielektrikumú kondenzátoroknál, ideális esetben, U_G széles tartományán belül K_N értéke nem függ a vizsgáló feszültség amplitúdójától.

A különböző hőmérsékleteken 2·10⁴ óráig tárolt 250 V-os kondenzátor tételek (2., 4. és 5. tétel) átlagos K_N értékeinek U_G függvényében történt ábrázolását figyelemmel kísérve (7. ábra) megállapítható, hogy a +25 °C-on tárolt 2. tétel átlagos nonlineáris együtthatója 1,4·10⁻⁹ értékű, míg a +70 °C- és +125 °C-on tárolt tételknél kb. 9·10⁻¹⁰, tehát kedvezőbb érték adódott.

A 2. tételnél jelentkező magasabb átlagos nonlineáris tényezőre az 5. ábrán feltüntetett eloszlásképek alapján is következtethetünk.

A vizsgált feszültségtartományban mindhárom tételnél gyakorlatilag K_N -nek U_G -tól való függetlensége volt tapasztalható.

A kapott eredmények azt mutatják, hogy fóliafegyverzetű, hegesztett kivezetőjű, poliészter dielektrikumú kondenzátorok esetében, adott kondenzátor

családon belül, az azonos kapacitású kondenzátorok közül, viszonylagosan a magasabb névleges feszültségű típus rendelkezik kedvezőbb nonlinearis tulajdonságokkal. A jelenség a nagyobb geometriai méretek következtében megnövekedett kontaktus felülettel, valamint a vastagabb dielektrikum fólia által biztosított nagyobb kontaktusnyomással magyarázható.

A poliészter-fólia utólagos zsugorodásával hozható kapcsolatba, hogy a $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on, vagy annál magasabb hőmérsékleteken tartósan tárolt kondenzátorok átlagos nonlinearitási tényezője kisebb volt annál, mint ami a szobahőmérsékleten tároltaknál kimutatható volt.

A vizsgált típusoknál a nonlinearitási tényező U_0 -tól való függetlensége volt tapasztalható, ezért a vizsgált U_G feszültség tartományon belül, K_N ismeretében a 3. harmonikus amplitúdójának kiszámítására az $U_3 = K_N U_G^3$ összefüggés korlátozás nélkül alkalmazható.

I R O D A L O M

- [1] Nögel, O.: Klirren, Rauschen und Spannungskoeffizient von Schichtwiderständen. Firmenzeitschrift ROEDER-STEIN 16/1970. 57 p.
- [2] Kirby, P. L.: The non-linearity of fixed resistors. Electronic Engineering 37/1965. 722 p.
- [3] IEC Technical Commitees N° 40 (Sweedeen) 161 March 1967.