

Villamos főberendezések üzembiztonságának egyszerű és gazdaságos növelése a szigetelések állapotellenőrzésével, a diagnosztika sajátosságai és legújabb eredményei (különös tekintettel a transzformátor és generátor diagnosztikára)

A nagyfeszültségű hálózati berendezések időszakos ill. folyamatos (monitoring jellegű) szigetelés állapot ellenőrzésének célja lényegében olyan vizsgálatsorozatok végrehajtása üzemzavarok ill. meghibásodások megelőzése, vagy legalább azok számának csökkentése érdekében, ami egyúttal minimalizálhatja a karbantartási, felújítási, végső soron az üzemeltetési költségeket is.

A nagyteljesítményű transzformátorok és generátorok a villamosenergia rendszer legértékesebb berendezései. A rendszer üzembiztonsága szempontjából kiemelt fontosságú, hogy ezen egységek váratlan kiesésének száma a lehető legkisebb legyen. Az üzembiztonságot nagymértékben befolyásolja a szigetelés állapota, így villamosenergia rendszer megfelelő minőségen történő rendelkezésre állása szempontjából kiemelt fontosságú, hogy a villamosenergia rendszer két legértékesebb berendezése megfelelő hatékonyságú, korszerű szigetelés állapot ellenőrzési rendszerrel rendelkezzen.

Köztudott, hogy a legtöbb villamosenergia termelő, szállító ill. szolgáltató vállalat az utóbbi évtizedben új helyzettel találta magát szemben, mint például jelentős szervezeti átalakulások mentek végbe, egyre kevesebb szakértő áll rendelkezésre az eszközállomány menedzselésére, nyomás nehezedik rájuk költségek csökkentére, jelentős a 20-30 évet meghaladó korú berendezések száma, melyeket csak a koruk miatt lecserélni egyértelműen nem lenne gazdaságos, stb. A villamos berendezések gazdaságos üzemeltetéséhez igen fontos tehát, hogy a helyszínen ill. a laboratóriumban elvégzett vizsgálatok alapján döntést lehessen hozni a berendezések jóságáról, e nagy értékű egységek szigetelési állapotáról, vagyis szükség van-e valamilyen beavatkozásra (pl. karbantartásra, helyszíni vagy gyári javításra, felújításra), ill. esetleg az egység teljes cseréjére esedékes.

Változásban vannak a diagnosztika hangsúlyai is. A nagyfeszültségű berendezések szigetelés állapot ellenőrzése nemcsak műszaki feladat, mert a fő cél a berendezés élettartamának olyan menedzselése, ami minimalizálja az összköltséget, azaz egy optimális arányt alakít ki a beruházási, üzemeltetési, javítási, stb. költségek terén. A megfelelő hatékonyság eléréséhez – egy kicsit a "humán egészségügyi diagnosztikából" vett példa alapján - minél több információt kell begyűjteni a berendezés állapotáról, a megelőző időszakban a szigetelés állapotát érintő minden fontosabb történésről, majd az összes rendelkezésre álló adat birtokában kell véleményyt mondani az általános állapotról.

1. Generátorok és transzformátorok diagnosztikájának műszaki és gazdasági aspektusai

A generátorok ill. transzformátorok diagnosztikáját meghatározó műszaki és gazdasági megfontolások legfontosabb elemei felsorolásszerűen az alábbiak szerint csoportosíthatóak:

- A nagyteljesítményű és nagyfeszültségű generátorok ill. transzformátorok a villamos energiarendszer egyik legértékesebb berendezései.
- E két egység üzembiztonsága nagymértékben ill. meghatározóan befolyásolja a rendszer üzembiztonságát.
- Az üzembiztonság miatt szinte állandó információ igény merül fel a pillanatnyi állapotra vonatkozóan, ezt pedig csak egy megfelelő színvonalú, optimális kiépítésű, korszerű off-line és on-line diagnosztikai rendszer biztosíthatja.
- Az üzemeltetők hazai vonatkozásban viszonylag új helyzettel találták magukat szembe, mert növekszik az idős egységek száma, egyre kevesebb szakértő személyzet áll rendelkezésre az állomány menedzselésére, nyomás nehezedik rájuk a beruházási, az üzei, a karbantartási, felújítási, stb. költségek csökkentésére, jelentős szervezeti átalakulások mentek végbe az utóbbi időkben, a megszokott néhány cég helyett több új és régi, neves és jelenleg még "névtelen", már megbízható ill. még nem igazolt megbízhatóságú, kis és nagyobb társaság vált piaci szereplővé, sok új diagnosztikai technika jelent meg (ez pozitív), de nehéz köztük az eligazodás (ez sokszor negatív tényezőként jelentkezik).
- A diagnosztikai műszerek és módszerek egyébként igen hasznosnak tekinthető folyamatos fejlesztéséhez képest időben rendkívül lemarad a megfelelő tankönyvek írása, de több éves késéssel jelennek meg a szabványok, szabványajánlások ill. útmutatók is. Ezért leginkább csak a fejlesztésben érdekeltek tanulmányira lehet hagyatkozni, ha naprakész akar lenni egy diagnosztikai szakember, így nehéz a diagnosztika területén a megfelelő áttekintés.
- A „dereguláció” néhány éve világhírességé vált és a „versenytársak” miatt a gazdaságosságra való törekvés óriási nyomásként jelentkezik az energia szektor minden részében. A hatékony diagnosztika jelentős kiadásoktól mentesíthet, de nem megfelelő döntés esetén többletköltséggel is járhat.
- Bár az összefüggések eléggé összetettek és bonyolultak, a különböző résztvevők között a kommunikáció nem könnyű, de a legfontosabb összefüggés mindenütt ugyanaz: **nyereség = bevétel – költségek**. A költséget két kategóriába lehet csoportosítani: normál viszonyok és „abnormál” viszonyok mellett jelentkező költségekre. A "**normál viszonyok**" melletti költségek: vétel, beruházás, üzemeltetés, vizsgálatok, monitoring és diagnosztikai tevékenységek, karbantartás, javítások, biztosítás, értékcsökkenés. Az „**abnormál viszonyok**" melletti költségek: járulékos javítás, egyes elemek cseréje, nem tervezett kiesések (és ebből adódó szállítói követelések), várható élettartam csökkenés, meghibásodások, meghibásodás okozta perifériás sérülések, környezetvédelmi károk.

2./ Az olaj-papír szigetelésű transzformátorok diagnosztikai sajátosságai

Az olaj-papír szigetelés néhány fontosabb sajátossága

A nagyteljesítményű transzformátorokra vonatkozóan két jellegzetes tulajdonság emelhető ki. Az egyik, a fentebb említett életkor növekedés, azaz, csak a koruk miatt csere egyértelműen nem lenne gazdaságos. A másik fontos tulajdonság, hogy a szigetelés évtizedek óta olaj-papíros, még napjainkban is szinte kizárólag ezzel készülnek az új berendezések, így az olaj-papíros diagnosztika még az elkövetkező 20-30 évben is fontos szerepet fog kapni.

Az **olaj-papír szigetelésű** transzformátorokra vonatkozóan általánosan jellemző, hogy az összetett olaj-papíros szigetelés speciális tulajdonságai (öregedésre és elnedvesedésre nagyfokú hajlamosság) miatt nagyon összetett folyamatok mennek végbe az élettartamuk folyamán. Egyetlen jelenség is, (pl. a szigetelés elnedvesedése), több állapotjellemzőt megváltoztathat (változik a polarizációs spektrum a szigetelési ellenállás, a veszteségi tényező, csökken a részkisülések begyújtási feszültsége, stb.). Az öregedési folyamatok bonyolultsága és nem teljes mértékben való feltárása, a rendelkezésre álló és helyszínen végrehajtható mérések során jelentkező nehézségek, stb. miatt időnként egymásnak ellentmondó eredmények születhetnek. Az eredmények megbízhatóbb és hatékonyabb kiértékelése céljából, minél több információt kell begyűjteni a berendezés állapotáról, beleértve a diagnosztikát megelőző időszak állapotát érintő minden fontosabb történésüket is, és az összes rendelkezésre álló adat birtokában kell véleményt mondani az általános állapotról. Általában elmondható, hogy nincs olyan egyetlen, prioritást élvező diagnosztikai módszer sem, amelyet kizárólagosan alkalmazva hatékony döntést lehetne hozni az általános szigetelési állapotra vonatkozóan.

A fentiek figyelembe vételével a transzformátor szigetelési állapot időszakos ellenőrzésének célja röviden a következőkben foglalható össze:

- A szigetelési hibák korai észlelése, ezáltal a váratlan kiesések, üzemzavarok számának csökkentése.
- A szigetelés öregedési állapotának megfelelő üzemeltetés a gazdaságosság szem előtt tartásával, a legkedvezőbb élettartam biztosítása.
- Döntéshozatal a szükséges teendőkről (javítás, felújítás, stb.).

A transzformátorokban zajló szigetelésromlási folyamatok lényegében két nagy csoportba sorolhatók.

Az **egyik** csoportba a térben korlátozott kiterjedésű, valamilyen túligénybevétel (villamos, termikus vagy mechanikai) miatt fellépő helyi romlások, roncsolódások tartoznak. A helyi villamos túl-igénybevételek részleges kisüléseket váltanak ki, roncsolva a környező szigeteléseket. Idővel, az ilyen roncsolódás teljes átütést okozhat. A helyi termikus túl-igénybevételek ún. melegpontokat képeznek, melyek szintén fokozatosan degradálják a papírszigetelést és elősegítik az olaj korai oxidációs öregedését. A helyi mechanikai túl-igénybevételek - melyeket elsősorban rezgések, vagy zárlatok erőhatásai okoznak - a papír fizikai roncsolódását, és ennek következtében esetlegesen villamos túl-igénybevételt is okozhatnak. A következmény általában rövidebb, hosszabb idő alatt kialakuló - menetzárlat.

A **másik** csoportba az olaj-papír szigetelés egész tömegére kiterjedő, viszonylag lassú, természetes öregedési folyamat által okozott változások sorolhatók. Ezek közé tartozik az olaj fizikai és kémiai tulajdonságainak változása, a szilárd szigetelés degradációja, és a szigetelés, mint összetett rendszer elnedvesedése. Ennek oka lehet egyrészt az öregedési termékként keletkező, másrészt a kívülről behatoló nedvesség.

Az olajjal itatott papír szigetelés általános állapotát leginkább az öregedés és a nedvesség befolyásolja. Kétségtől a kettő közül a nedvesség játszik jelentősebb szerepet, mert nem közvetlen módon, de végeredményben a szigetelés átütését válthatja ki. A nedvesség közvetlen hatása lényegében az alábbi formákban jelentkezik: gyorsítja a papíros kémiai degradációját, növeli a dielektromos veszteségeket, csökkenti a részleges kisülések begyújtási küszöbfeszültségét, növeli a buborék képződést, stb. A papír kémiai degradációja lényegében a cellulóz molekulaláncok átlagos hosszának, azaz a polimerizációs fokának (DP) csökkenését eredményezi. A polimerizációs együttható csökkenésével a papír mechanikai

tulajdonságai romlanak.

A nedvesség növeli a dielektromos veszteségeket egyrészt, mert növeli a polarizációs veszteségeket, másrészt a vízben oldódó szennyezések ionjait mobilizálja, ezáltal a vezetési eredetű veszteségek is nőnek. A nagyobb dielektromos veszteség miatt kedvezőtlen esetben termikus instabilitás is felléphet és hőátütés következhet be. A nedvesség további káros hatása, hogy elősegíti a részleges kisülések megjelenését, csökkenti a begyújtási küszöbfeszültséget, illetve elősegíti az egyszer megindult folyamatok továbbfejlődését (pl. buborékképződés).

A papír degradációja önmagában nem jár számottevő villamos paraméter romlással. Ezért általában nem közvetlenül, tisztán villamos, vagy hő-villamos átütés a szigetelés tönkremenetelének az oka, hanem az, hogy a polimerizációs együttható jelentős csökkenése a papír mechanikai szilárdságának gyakorlatilag teljes elvesztését jelenti. Ez pedig azzal jár, hogy a szigetelés nem lesz képes ellenállni az elektromágneses erőhatásoknak, zárlati, vagy bekapcsolási áramlökések esetén. Így alakulhattak ki olyan vélemények, amelyek szerint "öregedés miatt transzformátor még nem ment tönkre". Az öregedés és a mechanikai szilárdság fenti összefüggése viszont megmutatja, hogy ennek, ha csak közvetve is, fontos szerepe van a transzformátorok esetében.

A szigetelési rendszer két összetevője mind statikus, mind dinamikus vonatkozásban állandó szoros kölcsönhatásban van, a szigetelésellenőrzés szempontjából az olaj és a szilárd szigetelés mégis eltérő módon vizsgálható. Az alapvető különbség abból adódik, hogy a transzformátor olajából bármikor, különösebb nehézség nélkül minta vehető és az laboratóriumban megvizsgálható. Az olajminta vizsgálatából azonban a papír állapotára csak korlátozottan lehet következtetni. A papírtömegből viszont üzem közben mintát venni nem lehet, így az a közvetlen vizsgálatok számára általában hozzáférhetetlen.

A szigetelés két komponensének vizsgálatához rendelkezésre álló lehetőségek eltérő volta miatt a transzformátorok szigetelésellenőrzése két részre oszlik:

- Az olaj vizsgálata, közvetlen módszerek segítségével laboratóriumban
- A szilárd szigetelés általános állapot ellenőrzése közvetett módszerekkel

A transzformátor diagnosztika néhány sajátossága

Az állapot ellenőrzés a transzformátor üzemeltetésével ill. élettartamával kapcsolatos stratégia legfontosabb eleme. A transzformátorok **szigetelési állapot ellenőrzését** tulajdonképpen tágabban ill. szűkebben is értelmezhetjük. A **tágabb** értelemben minden olyan adat összegyűjtését jelentheti, amely egy adott egység esetén szükséges, hogy a hálózati követelményeknek megfeleljenek. Az adatok körébe beleértendő a transzformátor konstrukciós adatai, az üzemben eltöltött időszak alatt szerzett tapasztalatok, a gyári és helyszíni mérések eredményei, hasonló egységeken szerzett tapasztalatok, valamint a transzformátorok öregedésre, meghibásodására vonatkozó alapvető ismeretanyag. Az állapotellenőrzés **szűkebb** értelemben pedig a folyamatos ill. az időszakos diagnosztikai méréseket adatainak összegyűjtését és feldolgozását jelenti.

Az állapotellenőrzés helyét, megítélését, ill. szerepét nagyban befolyásolja a tulajdonos üzemeltetési stratégiája. A transzformátor üzemben tartására vonatkozóan **számos alternatíva** lehetséges.

Az **egyik**, amikor egy bizonyos életkorban (amikor még alig csökkent az egység rendelkezésre állási biztonsága) lecseréljük a transzformátorokat. Ez magas költséggel jár,

mert tulajdonképpen jóval az egység élettartamának vége előtt lecseréljük, de ugyanakkor egy új egység általában megbízhatóbb rendelkezésre állást is jelent.

A **másik** lehetséges megoldás, amit kis beruházási költséggel járó stratégiának lehetne nevezni, hogy minden egység a meghibásodásig maradna üzemben. Ez láthatóan nem reális alternatíva, nagy redundanciával járna, biztonsági és tervezési problémákat okozna.

Az optimális megoldás feltehetőleg egy olyan **harmadik** alternatíva lesz, amikor az egység cseréjére olyan időpontban kerülne sor, amikor a hálózaton maradás feltételeit már nem tudná kielégíteni. Ez azonban az összes transzformátorra vonatkozó pontos, megbízható állapot ellenőrzési rendszert feltételez, amelynek nem csak azt kellene jeleznie, hogy mikor várható a meghibásodás, hanem a rendszer követelményeket figyelembe véve becsülni tudná a meghibásodás valószínűségét ill. az egység „maradék megfelelőségét” (élettartamát). Más szavakkal, itt olyan információra lenne szükség, ami jelezi a meghibásodási valószínűséget, mint időfüggvényt, figyelembe véve a berendezés több évtizedre tervezett üzemét. A fenti adatok mellett még figyelembe kell venni a rendszerre vonatkozó megbízhatósági követelményeket, mert az a cél, hogy az egész rendszert tekintve a legkisebb költség adódjon, azaz a beruházási, a karbantartási, a diagnosztikai, az egység kiesésével járó, stb. kiadások költség minimuma jöjjön létre.

A költség minimum eléréséhez az egyik lehetséges hatékony út a **rutin** vizsgálatokat sorozatának adott gyakorisággal történő elvégzése látszik amely kimutatja a kezdődő hibát, információt szolgáltat az általános állapotról. A **speciális** vizsgálatokat csak akkor kellene alkalmazni, ha a pontosabb diagnózis vagy a részletes állapotbecslés válik szükségessé, mint például az alábbi esetekben:

- ha a rutin vizsgálat alapján indokoltá válik,
- ha védelmi működés belső hibát jelez,
- ha egy rendszer esemény sérülést okozhatott,
- ha kereskedelmi vonzatú felülvizsgálás szükséges,
- ha újra kell minősíteni az egységet,
- szállítás előtt és után,
- olajkezelés előtt és után a kezelés hatékonyságának megállapítása céljából,
- ki- ill. szétbontás előtt (a saját mérési eredmények „kalibrálása” céljából),
- új egység esetén (a referencia adatok felvétele céljából),

A **rutin** ill. a **speciális** vizsgálatok meglehetősen különböző követelményekkel rendelkeznek, amelyek a főbb jellemzői a következők:

A **rutin** vizsgálatokkal kapcsolatos követelmények az alábbiak:

- olyan érzékenység, amely a problémák korai felismerését teszi lehetővé,
- széleskörűség, lehetőség szerint minden meghibásodás „lefedésre” kerüljön,
- megbízhatóság, ne adjon hibás riasztást, de ne mulassza el észre venni a kifejlődő hibát,
- olcsóság, és univerzális alkalmazást tegyen lehetővé,
- ha lehet on-line rendszerű legyen, nagyon kis valószínűségű kieséssel,
- legyen alkalmas a periodikusan megjelenő hibák detektálására.

A **speciális** vizsgálatokkal kapcsolatos legfőbb követelmények pedig az alábbiak:

- legyenek specifikusak, az állapotra összpontosítsanak,

- egyértelmű és pontos diagnózist adjon a problémákra vagy kizárjon egy lehetséges problémát,
- megbízható legyen, a szakemberek bízhatnak az eredményekben,
- mennyiségi összehasonlításra legyen alkalmas,
- lehetőleg önállóan kiértékelhető eredményt adjon, ne csak trendanalízisre legyen alkalmas.

A speciális vizsgálatokkal és az egység kikapcsolásával járó költségek, a kiesési idő, stb. mind fontos kérdések, de ebben az esetben mégis másodlagosak, mert a speciális vizsgálatokat a fenti esetekben használják és jelentős költségkihatással jár a diagnosztika utáni döntés. Az alapvető, transzformátoron adott gyakorisággal végrehajtható, jelenleg legfontosabb **rutin és speciális** vizsgálati módszerek az alábbiak:

- hibagázanalízis (HGA) főleg helyi túligénybevételek okozta hibák kimutatására,
- olaj fizikai-kémiai tulajdonságainak vizsgálata főleg olaj öregedés vizsgálatára,
- FRA (Frequency Response Analysis), tekercs geometriai torzulásának vizsgálatára,
- veszteségi tényező (tg δ) az olaj-papír szigetelés általános állapotellenőrzésére,
- RVM (polarizációs spektrum) vizsgálat olaj-papír szigetelés általános állapotellenőrzésére, főleg a nedvességtartalom és az öregedés kimutatására,
- tekercs ellenállásának mérése vezeték törések, szakadások, fokozatszabályozó hibák kimutatására,
- kisülések villamos és akusztikus mérése helyi villamos hibák kimutatására,
- furánanalízis papír öregedés vizsgálatára.

Folyamatos monitoring technikák szükségessége és sajátosságai

A transzformátor diagnosztika területén a műszaki trend az on-line monitoring technika és a hozzákapcsolódó szakértői rendszerek térhódítása, ezért érdemes kiemelten kezelni a többi eljáráshoz képest. A drága berendezések üzeme szükségessé teszi, hogy az öregedéssel, a romlással kapcsolatosan minél több adatot gyűjtsünk össze. Ugyanakkor elengedhetetlen a berendezés pillanatnyi állapotának ill. maradék élettartamának minél pontosabb becslése, amelyre egy gazdaságos karbantartási, felújítási és selejtezési rendszer alapulhat. A versenyhelyzet új követelménye, hogy csökkentsük a karbantartási és az üzemi költségeket, ugyanakkor nagyobb ellenőrzést ill. felügyeletet gyakoroljunk a rendszer üzembiztonsága felett. Ezekhez a követelményekhez elengedhetetlen az on-line monitoring technika különböző szintű kiépítése.

A transzformátorok üzemeltetési körülményei nem teszik lehetővé, hogy általános felülvizsgálatra ill. karbantartásra hosszú időre kikapcsolják. Egy további sajátosság, hogy az előforduló hibák kifejlődéséhez szükséges idő sokszor rövidebb, mint amilyen gyakorisággal a rendelkezésre álló off-line diagnosztikai eljárásokat végrehajtásra kerülnek (pl. féléves HGA mérési gyakoriság, hetes ill. hónapos kifejlődési idejű hiba). Ha csak a fenti két sajátosságot vesszük figyelembe, akkor is könnyen belátható, hogy elengedhetetlen az állapot ellenőrzésre vonatkozó **monitoring technika** használata. A hatékony állapot ellenőrzésre alkalmas monitoring rendszernek alkalmasnak kell lenni a hiba megelőzésre azáltal, hogy megfelelő érzékenységgel folyamatosan detektálja az állapotot, minél korábbi állapotban jelzi a hibát, meg tudja különböztetni a normál, a hibás ill. a hiba gyanús állapotot, nem csökkenti a berendezés rendelkezésre állási biztonságát, illeszkedik a meglévő védelmi rendszerhez, stb. A hibastatisztikák analízise azt mutatja, hogy a transzformátoron az alábbi

kritikus részeken lehet hatásos a monitor technika alkalmazása:

- terhelés alatti átkapcsolók
- átvezetőszigetelők
- belső túligénybevételek kimutatása
- hűtőberendezések rendellenes működése
- rövidzár-biztonsági rendellenességek

Mint az jól ismert, a hőmérséklet növekedésével exponenciálisan nő az olaj-papír szigetelés öregedése, más szóval exponenciálisan csökken az élettartama, ezért az üzem közbeni folyamatos **hőmérséklet** ellenőrzés a legfontosabb feladat. Mint ismeretes, a tekercsek hőmérséklet profilja nem homogén eloszlású, de a legnagyobb hőmérsékletű hely értékét pontosan meg kellene határozni. A klasszikus megoldások már nem elegendőek, így kerültek alkalmazásra az un. száloptikai megoldások, amelyek lehetővé teszik, hogy a legnagyobb feszültségű helyen is mérni lehessen a hőmérsékletet.

Az új szűrőtechnikák ill. új elven működő mérőrendszerek lehetővé teszik, hogy az eddig nehezen elvégezhető részleges kisülések (PD) vizsgálata is végrehajtható legyen, sőt on-line rendszerű (PD) mérés álljon rendelkezésre mind villamos, mind akusztikus PD monitoring rendszerű vizsgálatra

Az olajban oldott gázok elemzése (HGA) az egyik legfontosabb állapot ellenőrzési módszer a helyi túligénybevételek (PD, túlmeleg, kötészhibák, stb.) kimutatására. Az új detektorok megjelenése, a szakértői rendszerek fejlődése, stb. lehetővé teszik, hogy a hibagázanalízis eddigi jó eredményei ne csak off-line, hanem on-line monitoring rendszerként is rendelkezésre álljanak.

3./ Generátorok állórész szigetelésének diagnosztikai sajátosságai

A generátorok területén hasonló a helyzet, mint a transzformátoroknál, azaz az üzemben lévő egységek közül egyre nagyobb a 25 éves vagy annál idősebb berendezések száma. Az üzemeltetők részéről természetesen felmerülő kérdés, hogy milyen a rendelkezésre állás biztonsága ill. mennyi a berendezés maradék élettartama. A generátor élettartamát tulajdonképpen az állórész szigetelés állapota határozza meg, ezért ennek a viselkedését kíséri legnagyobb figyelem. Az élettartamra vonatkozó kísérletek valamint gyakorlati tapasztalatok azt mutatják, hogy bár rendkívül összetett igénybevétel éri a szigetelést, és a végbemenő öregedési ill. a szigetelésromlási folyamatok is eléggé komplikáltak, a rendelkezésre álló diagnosztikai módszerek alkalmasak a pillanatnyi állapot ill. a maradék élettartam becslésére. A hatékony diagnosztikát lényegében az alábbi három fő terület határozza meg: a állórésztekercselés állapotellenőrzésére szolgáló (off-line) vizsgálatok, az on-line monitoring módszerek, valamint a hosszú élettartam vizsgálatok és üzemi mérések során szerzett tapasztalatok ill. kutatási eredmények.

A generátor állórész szigetelés sajátosságai

A nagyfeszültségű gépek szigetelésére mint alapanyagot még ma is a csillámot használják, természetesen a korszerű szigeteléseknél mind a további felhasznált anyagok, mind a gyártástechnológiai jelentős változáson ment át. Régebben a csillámot lapokra hasították, valamilyen hordozó fóliára (papír, selyem, üvegszövet) ragasztották pl. alkoholban

oldott sellakkal, majdezzel bepólyázták a vezetőket, végül az így szigetelt tekercset présbe téve összesütötték és a szigetelés tömör egésszé vált. A tömörítés igazában nem volt tökolés, a csillámlapok közt mindig maradtak légrétegek, össze nem ragadt felületek. A szigetelésben maradó üregek csökkentése érdekében alkalmazták a szigetelés telítését pl. bitumennel, mert az akkori vélemények szerint a hőre lágyuló bitumen a megrepedt, rétegesen szétvált szigetelés gépben kisütve újra összeragad, tehát a szigetelés kissé regenerálódó képes. Így fejlődött ki a kompaundált szigetelés és vált akkoriban egyeduralkodóvá. A kompaundált szigetelés kedvezőtlen tulajdonságai miatt a konstrukciót módosítani kellett (bitumen nem keményedik ki, így az általa összeragsztott felületeken igen lassú mozgások jöhetnek létre, a csillamlecek elcsuszhatnak, a szigetelés felgyűrődhet, az előbb említett regenerálódási folyamat korlátozott, a keletkezett résekből zárt üregek alakulnak ki, így a részleges kisülés növekszik, s ezt a folyamatot a túlmelegedések csak fokozzák, stb.). A csillámlapok helyett foszlatott csillámot (csillámpapírt) használtak, a hőre lágyuló telítőanyag helyett hőre keményedőt. A hordozót, rendszerint üvegszövetet és a csillámpapírt előre telítik kikeményíthető (térhálósítható) gyantával majd feltekerik a vezetőre és hőkezelik. Hőkezelés alatt a gyanta egyenletesen eloszlik, a rétegeket összeragasztja és végül kikeményedik. De lehetséges a gyártás úgy is, hogy a csillámpapírt és a hordozót szárazon tekerik fel a vezetőre, majd az így kialakított tekercset vákuumban telítik a térhálósodó gyantával. Ez utóbbi technológiával előállított tekercselés szigetelésében általában kevesebb a légzárvány.

A forgógépeknél használt nagyfeszültségű szigetelőanyagok hőmérséklet, villamos tér és mechanikai igénybevételek hatására romlanak. Ez jelenti, hogy ezáltal romlanak a villamos ill. mechanikai tulajdonságok is és az új állapotban még jó szigetelés, amely még a próbafeszültségen sen ütött át, nem fogja kiállni az üzemi feszültséget. Ezért világszerte törekednek olyan módszerek kifejlesztésére ill. bevezetésére, amelyek alkalmazásával meg lehet állapítani a szigetelés jóságát, valamint a maradék élettartamát. Különböző jellemzők és a meghibásodás közötti korreláció azt mutatja, hogy lehetséges roncsolásmentes vizsgálati eljárásokkal a valószínű szigetelési állapot gyakorlati igények megfelelő biztonsággal történő megállapítására.

Az állórész szigetelést érintő igénybevételek sajátosságai

A forgógép állórész szigetelések viszonylag egyszerűek és a nagyfeszültségtechnikában "kisfeszültségűek" (általában 25 kV alatt marad a névleges feszültségük). A szigetelést üzem közben termikus, villamos, mechanikai és egyéb környezeti igénybevételek érik. Ezek az igénybevételek egyidejűleg hatnak és egymás hatását pozitívan és negatívan is befolyásolhatják.

A szigetelést üzem közben termikus, villamos, mechanikai és egyéb környezeti igénybevételek érik. Ezek az igénybevételek egyidejűleg hatnak és egymás hatását pozitívan és negatívan is befolyásolhatják.

A **termikus igénybevételek** egyrészt a szigetelés vegyi lebomlását eredményezik, másrészt a hőmérséklet okozta méretváltozás jelentős dilatációs erőhatásnak teszik ki a szigetelést. A hőmérséklet emelkedés növeli a szigetelésben mindig jelen lévő gázzárványokban uralkodó nyomást, és így növelik a részleges kisülések gyújtási feszültségét.

A **mechanikai igénybevételek** egyrészt az egyes tekercselemekre az üzemi frekvencia kétszeresével ható normál elektromágneses erőhatások, másrészt a zárlati erőhatások eredményeként keletkeznek, de ide tartoznak a termikus igénybevétel hatására létrejövő fent

említett dilatációs erők is. Hatásukra a szigetelésben repedések keletkezhetnek, az egyes tekercselemek a hornyokban fellazulhatnak, és az ezt követő vibráció hatására jelentősen károsodhatnak.

A **villamos igénybevételek** hatására a generátorok szigetelésében, pontosabban azok gázzárványaiban kisülések jönnek létre. Ezek a helyi termikus igénybevétel mellett vegyileg is ronszolják az üregfalakat, növelve azok méreteit. A kisülések másik forrása a horonyfal és a szigetelés felülete közötti illesztési rés. A szigetelésre felhordott gyengén vezető réteg hívatott ennek kiküszöbölésére, ez azonban az egyes rudak fellazulása esetén lekophat és így hatástalanná válhat. A környezeti igénybevételek hatása elsődlegesen a hideg gépek elnedvesedésében, ill. a kötőanyag szennyeződésében (pl. olaj) jelentkezhet. Mindkettő a szigetelés szilárdságának csökkenéséhez vezet.

Az állórésztekercselés állapotellenőrzés sajátosságai

A szigetelés fentebb említett tulajdonságai az üzem közben fellépő igénybevételek következtében megváltoznak, általában romlanak. Ezt a romlást a szigetelőanyagoknál egyrészt öregedésnek, másrészt külső anyagok bejutása esetén elnedvesedésnek ill. elszennyeződésnek (olaj, nedvesség behatolása) nevezik.

A szigeteléseknek a legfontosabb tulajdonsága a **megfelelő villamos szilárdság**. Mivel a villamos szilárdság közvetlen vizsgálata generátorszigeteléseknél maradandó roncsolódással jár, az üzemben lévő szigetelőanyagok ellenőrzése csak **roncsolásmentes** vizsgálatokkal lehetséges, és ezekből kell következtetni a villamos szilárdság megváltozására, azaz az üzembiztonság csökkenésére. Nehezíti az általános ellenőrzési rendszer kialakítását az a tény, hogy a romlási folyamatok nem szükségképpen azonos értelemben és mértékben befolyásolják a szigetelőanyagok különböző jellemzőit, holott a szigetelési szilárdság egyértelműen csökken.

A cél azoknak a mérési eljárásoknak az alkalmazása, amelyek kimutatják az igénybevételek hatására bekövetkező elváltozást, a pillanatnyi állapotot, ill. azok előrehaladottsági fokát, megbízhatóan tudják jelezni a szigetelési szilárdság csökkenését, amelyek alapján dönteni lehet a további üzemeltetésről, ill. javaslatot lehet tenni a szükséges javításra, felújításra. Ha egy hibát kezdeti stádiumban ki lehet mutatni, úgy annak elhárítási költségei jóval kisebbek, mintha hagynánk a helyzetet súlyosbodni. Ha hiba jellegét és a kialakulási sebességét sikerül felmérni, a javítás előre programozható és így az energia-szolgáltatás megbízhatóságát fokozni lehet. A váratlan meghibásodások kockázatának csökkentésével az ezek során kiesett energia termelői árának sokszorosát kitevő, felhasználóknál jelentkező kár mértékét lehet csökkenteni.

Az időszakos állapotellenőrzés általában a lassan kifejlődő hibákat tudja felderíteni, már csak az alkalmazott 2-5 éves periodicitás miatt is. A bonyolult felépítés, öregedés valamint az igénybevétel sokrétűsége miatt néha nem sok információt kaphatunk egy olyan mérésből, amely egyetlen számszerű adat értékelésén alapul, mert a romlási folyamatok sokszor ellentétes hatást tudnak kifejteni. A generátoroknál pl. öregedésnél a kötőanyag mennyisége csökken, "kiszárad" a szigetelés. Ilyenkor a dielektromos jellemzők némelyike javul (pl. a szigetelési ellenállás nő), holott a szigetelés állapota romlott, a részleges kisülés intenzitása viszont növekszik. Ebből is látható, hogy több állapotjellemző egyidejű vizsgálata vezethet megfelelő diagnosztikához.

Az szigetelési állapot ellenőrzése különböző **roncsolásmentes és feltételesen roncsolásmentes** vizsgálatok sorozatából áll. Ezek önmagukban mind számszerűsíthető

eredményeket adnak, amelyekhez eredetileg különböző határértékek rendelhetők. Az ilyen állapot-megítélés eredményességét azonban jelentősen korlátozzák az egyes gépek közötti eltérések. A romlási folyamatról általában jobb képet nyújt az azonos gépen, közel azonos körülmények között végrehajtott vizsgálatok eredmény trendjének tanulmányozása.

Az általános állapot ellenőrzéstől nem lehet elvárni a nem az egész szigetelésre kiterjedő, un. helyi hibák kimutatását, de elvárható egy ilyen vizsgálatról, hogy az állapotra jellemző hibát kezdeti állapotban mutassa ki, hogy annak elhárítási költségei jóval kisebbek legyenek mintha bekövetkezett volna a hiba.

Az alábbiakban két olyan roncsolásmentes, villamos jellegű, időszakos vizsgálat ($tg\delta$ /C és részleges kisülés) bemutatására kerül sor, amelyeket ez eddigi tapasztalatok szerint a legeredményesebben lehet a generátor állórész szigetelés helyszíni vizsgálatában alkalmazni.

Veszteségi tényező ($tg\delta$)/kapacitás és részleges kisülés mérése

A hagyományos dielektromos jellemzők (szigetelési ellenállás, abszorpció tényező, veszteségi tényező, stb.) egyenkénti vizsgálata nem ad mindig egyértelmű eredményt a szigetelés jóságára, így minél több vizsgálat alkalmazására van szükség. Az üzemeltető igénye az lenne, hogy a pillanatnyi állapoton kívül meg tudnánk ítélni a szigetelőanyag un. szigetelési tartálékát, azaz az élettartamának melyik szakaszában van, milyen messze van kritikus romlás állapotától.

Egy valós dielektrikumban a szigetelési ellenállás véges értéke és a polarizáció periódusonkénti átrendeződése miatt a váltakozó térben dielektromos veszteség jelenik meg, az ideális szigetelés tiszta kapacitív árama mellett ohmos összetevő is jelen van. A fenti viszonyokat legjobban a **$tg\delta$, vagy más néven veszteségi tényező** vizsgálatával tudjuk követni, így a veszteségi tényező, a dielektromos állandó és a fajlagos ellenállás mellett a szigetelőanyagok harmadik legfontosabb jellemzője. Az erősáramú technikában használt anyagoknál általában a fajlagos veszteségek kicsik, ennek ellenére döntő mértékben hozzájárulhatnak az átütéshez.

Ha az anyag fajlagos vezetőképessége viszonylag nagy (kicsi a szigetelési ellenállás), és nagyidőállandójú polarizáció nincs az anyagban (ill. a polarizációnak nincs 50 Hz közeli komponense), akkor az ipari frekvencián mért wattos áram a vezetési árammal egyenlő, a $tg\delta$ a frekvencia függvényében hiperbolikus törvény szerint monoton csökken, a hőmérsékletfüggése exponenciális jellegű. A hőmérsékleten kívül a veszteségi tényező függ a szigetelés anyagától, öregedésétől, elnedvesedésétől, stb, azaz az állapotától, így jól használható diagnosztikai célra.

A műszaki gyakorlatban általában az az eset áll fent, hogy a szigetelések szilárd szigetelőanyagai - nem mindig szándékosan - soros és párhuzamos rétegzésűek. Ezt a rétegzést gyakran gázzárványok okozzák amelyek villamos teherbíró képessége jóval kisebb, mint a környező szilárd, esetleg folyékony anyagoké, sőt a dielektromos tényezőjük is kisebb. Így már üzemi feszültségen kisülések indulnak meg bennük, vezetővé válhatnak. Az elemi üregek átütése azt is jelenti, hogy az átütésnél egy kis elemi kapacitás rövidrezáródik, az eredő kapacitás nő. Ez a folyamat a feszültség frekvenciájának ütemében ismétlődik, energiát fogyaszt, a veszteség növekedését vonja maga után.

A fenti rövid eszmefuttatásból is látható, hogy mind a $tg\delta/C$, mind a részleges kisülés

feszültség függvényében való vizsgálata jól jellemzi a szigetelés jóságát ill. minőségét. A veszteségi tényező/kapacitás, valamint a részleges kisülés (villamos és ultrahangos) vizsgálatok eredményeinek összehasonlítása és együttes kiértékelése minőségileg új diagnosztikát jelent ahhoz képest, mintha a kettőt egymástól függetlenül vizsgálnánk.

Általánosan elmondható, hogy a jó minőségű szigetelések **veszteségi tényezője** kisebb, mint a fent megadott érték, a feszültség függvényében vagy változatlan, vagy enyhén emelkedik. Minden más, ettől eltérő feszültségfüggés a szigetelés valamilyen hibájára utal. Ha a laposabb kezdeti szakasz után hirtelen növekedés tapasztalható, akkor rendszerint a szigetelés belsejében vagy a felületén intenzív kisülések indulnak meg. Jobb szigetelési állapotot jelent az az eset, ha a $0,2 U_n$ feszültségen magasabb értékű a t_g delta, de feszültség függvényében jelentős mértékben csak a fázis feszültség felett indul növekedésnek, mint az az eset, amikor viszonylag alacsony kezdeti értékkel rendelkezik, de már a fázis feszültségnél kisebb értéknél is jelentős a feszültség függvényében történő növekedés. Mint már említésre került, ha a szigetelő belsejében fellépő erős részkisülés ill. ionizáció miatt az üregek rövidrezáródnak ill. az elektródok látszólagos felülete megnövekszik, nő a kapacitás, tehát a kapacitás feszültségfüggése is jól használható diagnosztikai célra.

Részleges kisülés (PD) keletkezhet egy szigetelő anyagban akkor, ha homogén minőségű az anyag, de erősen inhomogén a tér, vagy enyhén inhomogén az erőtér, de a dielektrikum mutat erős inhomogenitást. A letört tartomány konstans nagyságú feszültség esetén lehet időben állandó kiterjedésű, de lehet monoton terjedő is. Az előbbi típus a gázokban és folyadékokban tapasztalható, az utóbbi szilárd szigetelőanyagokban, mindenképp előtt a szintetikus szerves anyagokban lép fel.

Mind a gyártás technológiai kivitelének, mind a maradék élettartam megítélésének szempontjából nagy jelentőséggel bír a részleges kisülés mérési technikája, bár még nem alakult ki egységes minősítési rendszer a komplikált viszonyok miatt.

Mint részleges kisülések mérési elméletéből ismert, a részleges kisülések valódi töltéseit közvetlenül nem lehet megmérni, hanem csak az ezzel tapasztalati összefüggésben álló látszólagos töltést, főleg a tekercselés egyedi elemének, rúdjának a mérése alkalmával. Teljes tekercselés esetén már nem lehet koncentrált kapacitásnak tekinteni a szigetelést, számolni kell a részleges kisülési impulzusok hullámterjedési és csillapítási jelenségeivel.

A gyakorlati kiértékelésben nagy segítséget jelent, ha a gépet bizonyos időközönként mérve a relatív változást érzékelhetjük. A forgógépeken előforduló részleges kisülések statisztikailag szeszélyesen változó nagyságú és sűrűségű impulzussorozatok, amelyeknek különböző fajta középértékét vagy az egyedi impulzusok csúcsértékét mérik. Empirikus módon bizonyos tipikus hibák, szigetelési állapotok ezekkel a mérési eredményekkel korrelációba hozhatók.

Forgógépek szigetelésében a konstrukciós viszonyok mellett, a főleg négyszögletes rúdkeresztmetszet és a bonyolult geometriájú tekercsfaj miatt nem lehet teljesen kiküszöbölni a részleges kisülések előfordulását. Ezért a nagyfeszültségű forgógép szigetelésekben nem nélkülözhető az ívkisülésekkel szemben rendkívül ellenálló csillám, akár hasított (splitting), akár mikapapír alakjában alkalmazva, megfelelő hőre keményedő műgyantába ágyazva, préselve, villódzást gátló bevonatokkal ellátva.

A részleges kisülések keletkezési helye a különböző légzárványokban van, amelyek előfordulhatnak finom eloszlású gömbszerű alakban, pl. a kötőanyag polimerizációja során

keletkező gázok, esetleg oldószerek hatására, vagy a rétegek közötti nagyobb síkfelületű szétválásokban, delaminációkban. Mechanikai repedések, ill. kezdetben mikrorepedések keletkezhetnek mechanikai igénybevételek következtében, különösen akkor, ha a gyanta rugalmassága lecsökken a termikus vagy villamos öregedés hatására. A részleges kisüléseknek tartósan kitett légzárványok, repedések fokozatosan növekednek a szigetelőanyagban és ezáltal csökken a villamos szilárdság, előre halad az öregedési folyamat.

Az, hogy a légzárványokban a villamos térerősség hatására keletkeznek-e átütések, részleges kisülések, és ezek milyen helyi veszteséget és felmelegedést okoznak, sok körülménytől függ. A légzárványok geometriai viszonyai és a bennük lévő gáz fizikai paraméterei (hőfok, nyomás, fajhő) meghatározzák a helyi átütési térerősséget. A légzárvány átütésekor a villamos tér töltés kiegyenlítődés keretében hirtelen összeomlik. Az átütött gázzárvány a feszültség letörése után regenerálódhat és a tápláló feszültséggel arányosan újból feltöltődik az átütési feszültségig, és a jelenség ismétlődik. A kutatások során az tapasztalták, hogy a részleges kisülések kialakulásában a légzárványt körülvevő gyanta polimerizációs fokától is függő, bizonyos mozgékonyssággal rendelkező tértöltések is szerepet játszanak. A keletkező ív időállandója függ ezeknek az interfaciális tértöltéseknek az utánpótlásától, és így a hőmérséklettől, a gázösszetételtől, a nyomástól és az igénybevevő villamos feszültség periódusától.

A szigetelés belsejében keletkező részleges kisülések energiájánál lényegesen nagyobbak a horonykisülési energiák. A horonykisülések a szigetelés és a horony vastagsága között keletkeznek abnormális viszonyok mellett, ha a tekercsoldalak rezgése következtében a kapacitív töltőáram vagy a főmező által a rudak külső vezető bevonatában indukált áram rendszeresen mechanikusan megszakítódik. A laza kiékelés mellett a külső vezető réteg lekopása vagy egyéb okok miatt nagy helyi ellenállás is hozzájárul ennek a jelenségnek a bekövetkezéséhez.

Láthattuk, hogy a leggyakrabban használt **off-line** szigetelés állapot ellenőrzési módszer a veszteségi tényező ($\tan\delta$)/kapacitás, részleges kisülés különböző paramétereinek feszültség függvényében történő vizsgálata, szigetelési ellenállás ill. abszorpciós tényező meghatározása, ún. lépcsős feszültség diagnosztika. Az **on-line monitoring technikák** között fontos szerepet kap a hőmérséklet mérés, gázanalízis (ózon ill. éghető gázok), rezgésanalízis, PD mérés. Monitoring, vagy pontosabban on-line (folyamatos) monitoring esetünkben hasonlóan definiálható, mint a transzformátoroknál, azaz a szigetelés állapotának figyelése az ismert normál állapothoz képesti romlás folyamatos detektálásával.

A **monitoring** rendszer alkalmazásának legfőbb célja egy katasztrofális meghibásodás elkerülése, ezen kívül a hiba korai felismerésével csökkenthetjük a karbantartásra fordított költséget és időt, ezáltal növekszik a rendelkezésre állás biztonsága, csökkennek a költségek. Egy monitoring rendszer alkalmazása feltételezi, hogy ismertek a normál és a még megengedhető leromlott állapot paraméterei, rendelkezésre állnak a megfelelő detektorok, ismert a rövid ill. hosszú távú romlás kritériuma. A monitoring rendszere megbízhatóságától ill. az üzemeltető szándékától függően egy rövidtávú meghibásodás esetén jelzést adhatunk, vagy lekapcsolhatjuk a hálózatról a berendezést. Láthatjuk, elengedhetetlen, hogy a megbízható szenzorok mellett az üzemeltető személyzet is megfelelő ismeretanyaggal rendelkezzen, hogy jó és megfelelő időben hozzanak döntést a monitoring rendszer figyelmeztető jelzésénél.

Balatonfüred, 2001. április 26-27.