

## Zárójelentés

A jelentés tárgyát képező kutatás szerves folytatását képezte a kilenvenes évek elején elkezdett kutató munkánknak, amelynek célja annak elősegítése volt, hogy a villamos energia nagy üzembiztossággal szállítható legyen a környezetvédelem, illetve a villamos energetika terén újszerű környezeti, valamint gazdasági elvárások teljesülése esetén is. A megbízható villamosenergia ellátást leginkább veszélyeztető események a kiterjedt rendszer-üzemzavarok, illetve -összeomlások, amelyeknek megelőzéséhez, illetve erőteljes korlátozásához jelentős társadalmi, technikai és gazdasági érdekek fűződnek. Ezek létrejöttének nem elhanyagolható valószínűségét tanúsítja a tény, hogy ilyen események az utóbbi évtizedekben több alkalommal előfordultak. A kiterjedt üzemzavarokat elindító okot az esetek túlnyomó többségében az átviteli hálózat nagyfontosságú vezetékain, illetve jelentős szerepet játszó állomásaiban bekövetkezett, háríthatatlan zárlatok képezték. Ebből kiindulva a kutatás alapvető feladatának a zárlatok bekövetkezésére vezető okok feltárását terveztük, a zárlatok megelőzését, illetve az esetlegesen bekövetkezett zárlatok gyors hárítását elősegítő módszerek, intézkedések kidolgozását.

Az átviteli rendszer zárlatainak jelentősebb hányada a nagyfeszültségű vezetékeken keletkezik, ezért elsősorban ezen rendszer *távvezetékeinek* zárlataival foglalkoztunk. A kutatás tervezési stádiumának idején azonban komoly gondot okoztak a magyar villamosenergia-rendszer átviteli hálózatának egyes *állomásaiban* a külföldi licencia alapján gyártott 400 kV-os SF<sub>6</sub> oltóközegű megszakítók zárlatai is, amelyek elsősorban a hazai atomerőmű üzemének folyamatosságát veszélyeztették. E zárlatokat a hálózaton lejátszódó tranziens folyamatok idején kialakuló túlfeszültségeknek tulajdonították. Kiderítettük, hogy a megszakítók zárlatait nem az átviteli hálózat tranziens igénybevételei okozzák, hanem a megszakítóknak összegyűlt fémpor. A megszakítók ilyen eredetű zárlatokra való hajlamát a licencia adó is felfedezte és az újabb gyártás már javított konstrukcióval folyt. Tekintve a régi konstrukciójú megszakítóknak a hazai hálózaton felszerelt nagy számát, kutatási tervünkbe beépítettük egy olyan kondicionáló eljárás kidolgozását, amely lehetővé tenné a megszakítóknak felgyülemlett fémpor elégetését a megszakító felnyitása nélkül. A módszer gyakorlati kidolgozása és kipróbálása költséges nagyfeszültségű és nagyáramú vizsgálatokat igényelt, aminek finanszírozását egyes felhasználók kilátásba helyezték. A kutatás kezdeti szakaszát követően azonban nem láttuk biztosítottnak a kísérleti munka anyagi fedezetét, mert a felhasználók nagy része külföldi gyártású új konstrukciójú megszakítókkal váltotta ki a régebbi gyártásúakat. Ezért kértük a kutatási tervünk módosítást, amire engedélyt kaptunk.. A módosított munkatervből az átviteli hálózat 400 kV-os SF<sub>6</sub> oltóközegű megszakítói kondicionálási módszerének kidolgozása kimaradt és helyette az átviteli hálózat többrendszeres távvezetékeinek különböző rendszereiben lejátszódó tranziensek kölcsönhatása került. Fentiek alapján a módosult kutatási tervben az alábbi feladatok szerepeltek:

1. Különböző feszültségű, azonos oszlopsoron haladó távvezetékrendszerekben keletkező tranziens igénybevételek meghatározása, illetve befolyásolása.
2. A visszacsapás megelőzése villámcsapásnak nagy gyakorisággal kitett távvezeték oszlopokon.
3. Számítógépes szimuláció kialakítása több, igen nagy feszültségű rendszert tartalmazó, hosszú távvezetékre és a két rendszer elektromágneses tranziensei kölcsönhatásainak

vizsgálata, elsősorban a két rendszerben egyidőben keletkezett zárlat automatikus likvidálhatósága szempontjából.

4. A villamos energiarendszer elektromágneses tranziensei kutatására használt szimulációs módszerek fejlesztése.

A kutatás zárójelentése a négy feladat terén elért eredményeket fenti sorrendben foglalja össze.

*Különböző feszültségű, azonos oszlopsoron haladó távvezetékrendszerben keletkező tranziens igénybevételek meghatározása, illetve befolyásolása.*

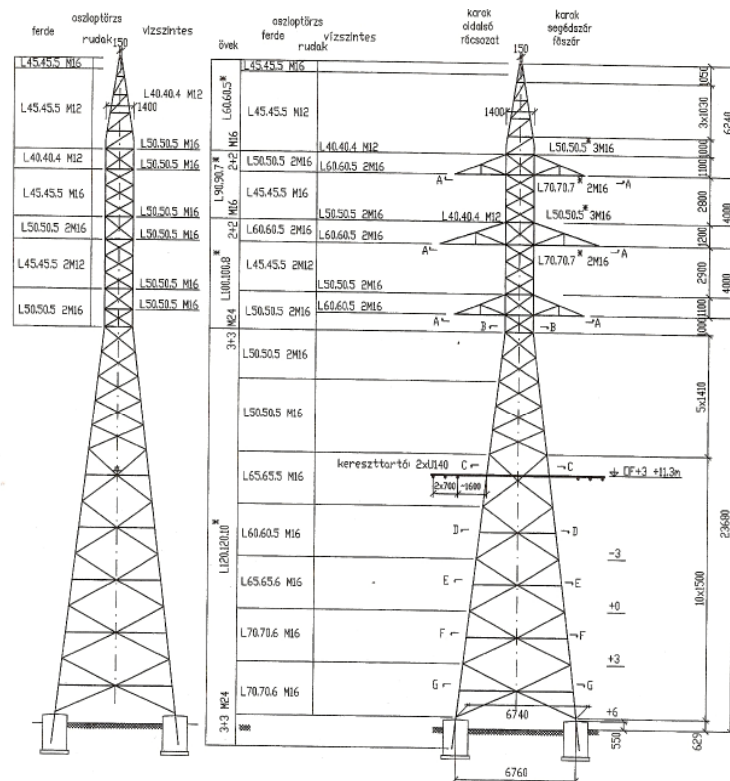
A távvezetéknek a környezetbe való illesztésével kapcsolatos társadalmi elvárások megkövetelik a távvezeték számának, illetve helyfoglalásának csökkentését. Ez a célkitűzés egyrészt olyan távvezetékkel valósítható meg, amelyeknek fázisok közötti távolsága és magassága kisebb, mint a konzervatív megoldásoké, vagyis a régebbinél kompaktabb konstrukciókkal. Ezeknél a fázis és föld, illetve fázisok közötti szigetelési távolság szükségszerűen kisebb, mint a konvencionális oszlopoknál. Kompakt távvezetéknel tehát a szigetelések villamos szilárdsága – egyéb intézkedések hiányában – kisebb lenne, mint a konzervatív konstrukciók esetében. A távvezeteki szigeteléseket egyrészt a túlfeszültségek (kapcsolási, illetve légköri eredetű) veszik igénybe, illetve szennyezett atmoszférájú zónákban az üzemi feszültség is okozhat szigetelő átíveléseket. A kapcsolási túlfeszültségek korszerű módon (pl. a megszakítók szinkron működtetésével) való korlátozása lehetőséget ad a szigetelési távolságok csökkenésével járó zárlati veszély kompenzálására, a műanyag, un. kompozit szigetelők előnyös felületi tulajdonságai, illetve a gyártástechnológiájukból következő, növelhető kúszóútja pedig a légköri szennyeződésből eredő zárlatok valószínűségének növekedési esélyét mérsékelik. A légköri eredetű túlfeszültség hullámok okozta átívelés mechanizmusából viszont az következik, hogy az ív nem a szigetelőfelület mentén, vagy közelében, hanem általában a szigetelő ívterelő-szerelvényei közötti legrövidebb úton alakul ki, tehát a szigetelők beépítési hosszától függ. Ezért a szigetelési távolságok lerövidülése esetén a villámcsapások hatására létrejövő zárlatok valószínűségének csökkenése általában nem kompenzálható. A leírtak miatt a kompakt távvezeték speciális túlfeszültségvédelmi rendszert igényelnek.

A távvezeteki oszlopok kompakt konstrukciójából származó előnyök növelhetők azzal, hogy ugyanazon távvezeteki oszlopokon több rendszert helyeznek el. A többrendszeres vezeték építésére az is kényszeríti a hálózat tulajdonosait, hogy világszertenövekednek az új távvezeték-nyomvonal megszerzésének lehetőségei. Ezért azon, már régebben is alkalmazott módszer mellett, amely szerint az átviteli hálózatok fontos vezetékeit lehetőleg kétrendszeres konstrukcióval valósították meg, ma már elterjedőben vannak az un. kombinált távvezeték is, amelyeknél közös oszlopsoron különböző feszültségű távvezeték haladnak. Ezeknek célja, megoldása sokféle lehet, aszerint, hogy milyen feszültségű rendszerek kerülnek azonos oszlopokra, milyen hosszan haladnak azonos oszlopsoron a különböző feszültségű rendszerek, tartalmaz-e a kombinált távvezeték a nagyobb feszültségű rendszer által meghatározott, hosszú oszlopokban olyan oszlopokat, amelyekre csupán a kisebb feszültségű rendszer vezetőit függesztik fel, stb. Ezért a kutatás eredményei elsősorban tendenciákat tartalmaznak, nem pedig teljesen általános megoldást.

A távvezeteki zárlatok következményei jelentős mértékben korlátozhatók a zárlathárító automatikákkal, amelyek zárlat esetén a távvezeték zárlatos fázisvezetőjét (EVA), illetve

mindhárom fázisvezetőjét (HVA) önműködően kikapcsolják, majd a feszültségmentes-, un. holtidő után visszakapcsolják. Az átviteli hálózaton, ahol a hálózati stabilitás fennmaradásához komoly érdekek fűződnek, elsősorban az EVA hatásos működését kell biztosítani, középfeszültségű elosztóhálózaton viszont általában csupán HVA képezi a zárlathárítás célszerű eszközét. Fentiek következtében a zárójelentés tárgyát képező kutatásban elsősorban azt vizsgáltuk, hogy az azonos oszlopsoron haladó azonos, vagy eltérő feszültségű rendszerek, amelyek elektromágnesesen csatoltak egymással, mennyiben segítik elő, vagy rontják a zárlathárító automatikák sikerességét. Emellett - tekintve a többrendszeres, kompakt oszlopokon elhelyezett távvezetékeknek az előbbiekben ismertetett túlfeszültség-érzékenységét, a kutatás célja az is volt, hogy tisztázzuk az egyes rendszerekben a többi rendszer stacioner, vagy tranziens folyamatai által kiváltott hatásait és megvizsgáljuk, hogy okozhatnak-e ezek olyan sajátos igénybevételeket, amely a konzervatív, egyrendszeres távvezetéseken nem jelentkeznek. Hasonló jellegű kutatás eredményeiről a szakirodalomban nem találtunk közleményeket.

Szimulációs számításaink alapjául olyan távvezetési oszlopot választottunk, amely két 120 kV-os és legalább két 20 kV-os rendszert tartalmaz. A távvezeték oszlop képét, illetve a fázisvezetőknek az oszlopon való elrendezését az 1. ábra mutatja, amelyben a két 120 kV-os vezeték és az egyik 20 kV-os vezeték szerepel. A másik 20 kV-os vezetékét a számításnál azért mellőzzük, mert a 20 kV-os rendszerek egymáshatása a 120 kV-os hatás mellett érezhetően nem érvényesül.



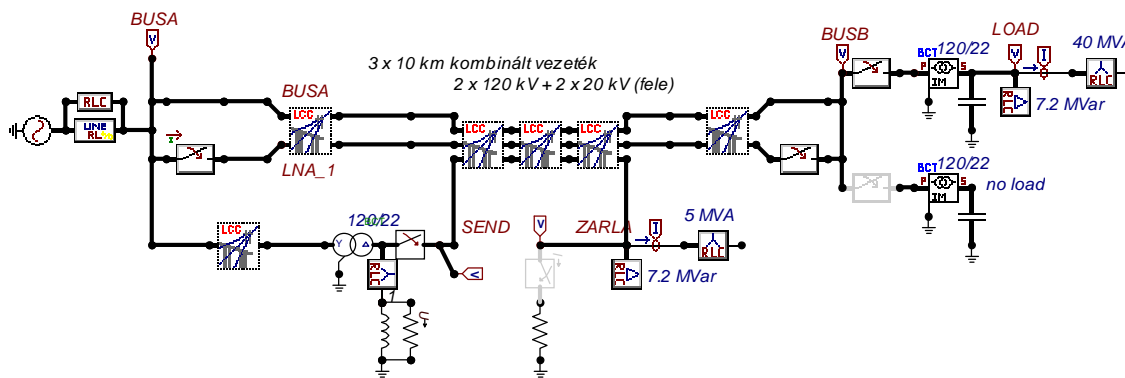
a. oszlopkép és -mérétek

## b. a védővezető és a fázisvezetők elhelyezése

### 1. ábra

Az 1. ábrán bemutatott, kombinált oszlop tipikusnak vehető és gyakorlatilag egyezik egy Magyarországon megvalósított és üzemelő kombinált távvezeték oszlopkonstrukciójával.

A szimulációs vizsgálatokat a 2. ábrán látható hálózatképre végeztük el. A szimulált hálózatban a 120 kV-os vezetékek hossza 70 km, ezen belül 30 km hosszon haladnak együtt a 20 kV-os vezetékkel. A 20 kV-os vezeték hossza 30 km, tehát végig a 120 kV-os rendszerekkel közös oszlopsoron halad. A 20 kV-os vezeték táplálása ugyanazon gyűjtősínről történik, mint a 120 kV-osoké, a gyűjtősínről leágazó 30 km hosszú, 120 kV-os vezeték végére csatlakozó 120/22 kV-os transzformátor szekunderére csatlakozik a 20 kV-os rendszer. A 20 kV-os vezeték kompenzált. A világszerte elterjedt szokás szerint mind a 120 kV-os, mind pedig a 20 kV-os vezetéket transzpozíció nélkülinek feltételeztük, amit az ilyen vezetékek rövid volta indokol.



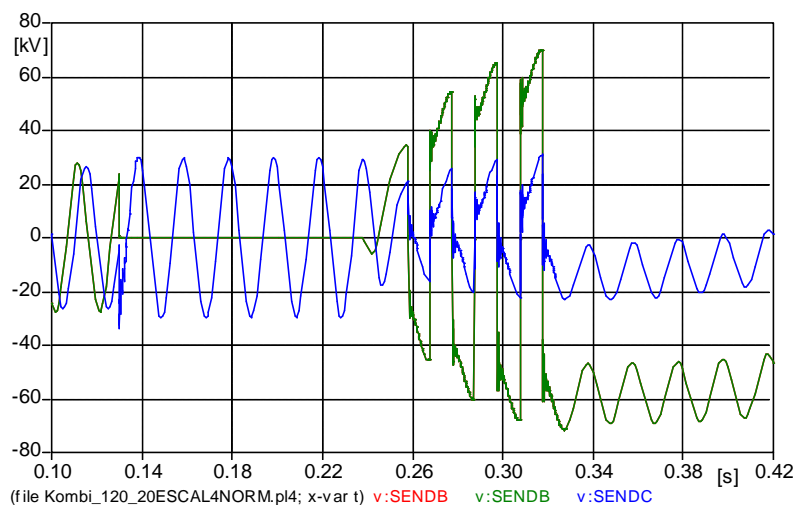
### 2. ábra

Számításaink kimutatták, hogy a nagyfeszültségű rendszereknek a 20 kV-os rendszerre normál üzemben kifejtett elektromágneses hatása következtében a 20 kV-os vezeték *fázisfeszültségei* jelentős mértékben eltorzulnak. Részben a 20 kV-os fázisvezetők közötti távolságok kis értéke, részben pedig a 20 kV-os vezeték fázisok közötti terhelő impedanciák szimmetrizáló hatása miatt torzulás a *vonali feszültségekben* szinte alig jelentkezik. A középfeszültségű rendszer fázisvezetőiben a zavarás - a nagy- illetve középfeszültségű vezetékek jelentős mértékben eltérő fázistávolsága miatt - viszonylag nagy amplitudójú, zérus sorrendű feszültség alakjában jelentkezik. A középfeszültségű hálózat kompenzált volta következtében a zérus sorrendű hálózat rezgőkör, amelynek frekvenciáját az üzemi

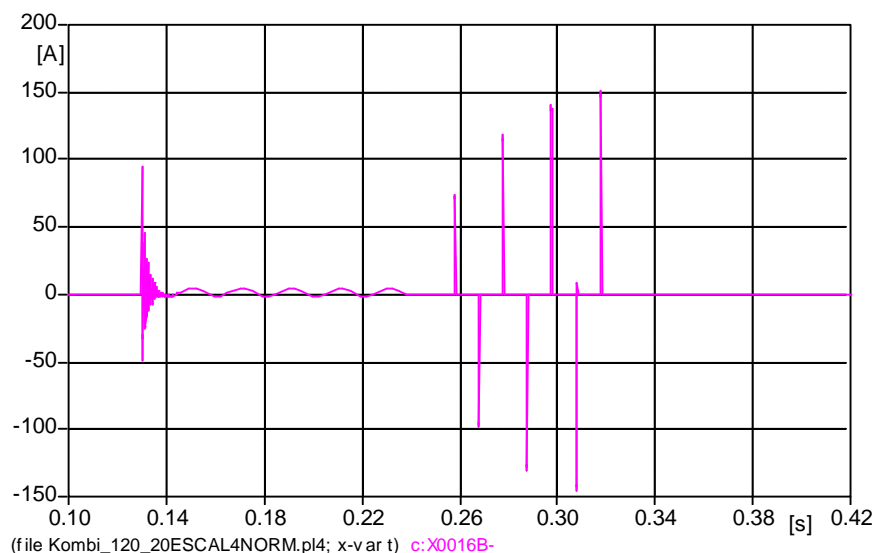
frekvenciához közeli értékre választják. A nagyfeszültségű vezeték által keltett zérus sorrendű feszültség ebbe a rezgőkörbe sorosan iktatódik be, ezért az üzemre veszélyes, az üzemi feszültség többszörösét kitevő rezonanciafeszültséget képes létrehozni.

Az általunk vizsgált kombinált távvezeték 20 kV-os fázisvezetőin a csillagponti feszültség (csillagpont-eltolódás) nagysága a 120 kV-os rendszerek kikapcsolt állapotában  $0.66 \text{ kV}_{\text{eff}}$ , a 120 kV-os vezeték bekapcsolt állapotában pedig  $10.7 \text{ kV}_{\text{eff}}$ , vagyis 16-szorosára nőtt a nagyfeszültségű rendszer hatására. Az utóbbi esetben a csillagpont-eltolódás hatására a fázisvezetőkön kis terhelési állapotokban az üzemi feszültség négyszeresét kitevő rezonanciafeszültségek jelenhetnek meg. Az ilyen, jelentős rezonanciafeszültség mindenképpen elkerülendő, mert egyrészt a vezetékre csatlakozó berendezések szigetelését túlterhelheti, másrészt pedig a vezetékre kapcsolt túlfeszültségkorlátozók termikus megfutását okozza.

Szimulációs vizsgálataink azt is kimutatták, hogy a nagyfeszültségű rendszerrel való elektromágneses csatolásból származó zérus sorrendű feszültség meggátolhatja a középfeszültségű rendszer íves zárlatának háromfázisú visszkapcsoló automatikával való tisztázását. A középfeszültségű vezeték kompenzált volta következtében íves zárlat esetében a zárlatot a folyamat későbbi szakaszában csupán impulzus jellegű átütések tartják fenn. Minden impulzus kialakását követően zérus sorrendű feszültség marad vissza a középfeszültségű vezeték fázisvezetőin, ezeknek szuperpozíciója sajátos feszültség-eszkálációt eredményezhet (3. ábra).



a. fázisfeszültségek



### b. zárlati áramimpulzusok

Feszültségeszkaláció a középfeszültségű rendszerben, HVA holtidejében

### 3. ábra

Amennyiben a feszültségeszkalációt eredményező folyamat szempontán nem szűnik meg a HVA holtidejének végéig, akkor nagy valószínűsége van annak, hogy a visszakapcsolás sikertelen lesz, tehát a középfeszültségű vezeték végleg kikapcsolódik.

Megállapítottuk, hogy a középfeszültségű rendszer FN, valamint 2FN zárlatainak kikapcsolását, illetve a zárlati ív kialvását követően fennáll a lehetősége a feszültségeszkalációra vezető sorozatos visszagyújtások bekövetkezésének mind a zárlattól felszabadult fázis(ok)ban, mind pedig az ép fázis(ok)ban. A folyamat fizikájából következik, hogy ugyanez a lehetőség fennáll háromfázisú zárlatot követően is, mert a feszültségeszkaláció megindulásához csupán az szükséges, hogy a mindkét végén kikapcsolt 20 kV-os vezeték földtől független legyen, rendelkezésre álljon a zárlati ívből visszamaradt plazma és a sorozatos visszagyújtások okozta tranziensek eredményeképpen monoton növekedjék a földhöz képesti feszültség. Az, hogy a feszültség-eszkalációt megelőző zárlat FN, 2FN, vagy 3FN volt, csupán a zárlati hely szigetelőképességének regenerációs sebességét befolyásolja, vagyis az eszkálációs folyamat valószínűségét. A folyamat kimenetele –ha az már megindult – csupán a kombinált oszlopon együtt haladó vezeték feszültség szintjétől, együtthaladási hosszától, az oszlopon való elhelyezésétől és a vezeték együtthaladásának hosszától függ. Az együtthaladás, vagyis az egymást befolyásoló rendszerek közös oszloponon való vezetésének hossza azáltal hat a feszültség-eszkaláció folyamatára, hogy megszabja a különböző feszültség szintű (tehát a befolyásoló és a befolyásolt) rendszerek közötti kapacitást, ami a visszagyújtások energiája, vagyis a zárlat helyének ionozottsága szempontjából meghatározó.

Kimutattuk, hogy a feszültség-eszkaláció abbamaradhat, ha a vezetéken túlfeszültség-korlátozók vannak felszerelve és a feszültség monoton növekedése ezeknek a korlátozási szintjét eléri. Ha a zárlat helyén az átütési ívek hossza valamilyen okból növekedik, akkor a korlátozó hatására a visszagyújtások sorozata megszűnik. Tekintve azonban azt a körülményt, hogy a visszagyújtások impulzusjellegűek, ezeknek a hosszára a szél

gyakorlatilag nincs hatással. Tekintetbe kell azonban venni azt a fontos gyakorlati szempontot, hogy amennyiben a középfeszültségű rendszer kompenzált, akkor az előzőekben ismertetett rezonanciafeszültség károsító hatását elkerülendő, a túlfeszültségkorlátozók védelmi szintjét igen magasra kell választani, ami a túlfeszültségvédelem szempontjából gazdaságtalan.

Abbamaradhat a feszültség-eszkaláció, ha valamelyik visszagyújtási áram nem a tranziens első, vagy második nullaátmenetkor szakad meg, hanem lényegesen hosszabb idő után, ennek azonban viszonylag kicsi a valószínűsége.

Szimulációs számításaink igazolták azon feltételezésünket, hogy a nagy- és középfeszültségű rendszer közötti elektromágneses csatolásból eredő rezonanciafeszültség túligénybevétele illetve a visszakapcsoló automatika eredményességét veszélyeztető feszülteszkaláció egyaránt kiküszöbölhető a nagyfeszültségű fázisvezetőknek a középfeszültségű rendszerrel való együtthaladás szakaszában létesített két transzpozíciójával. Az ismertetett káros folyamatok előfordulásának valószínűségét már egyetlen transzpozíció is csökkenti.

A nagyfeszültségű rendszer stacioner üzemének a középfeszültségűre kifejtett elektromágneses hatása mellett kutató munkánk annak tisztázására is irányult, hogy a nagyfeszültségű rendszerben lefolyó, nagy amplitudójú tranziensek zavarhatják-e a középfeszültségű rendszer működését. Megállapítottuk, hogy a középfeszültségű vezeték kikapcsolt, egyoldalról táplált, valamint terhelt állapotában lényeges túlfeszültségek nem keletkeznek ebben a rendszerben. Azonban kombinált távvezetéken fontos szerepet játszhat a különböző feszültségszinten lezajló tranziens folyamatok koincidenciája. Erre elsősorban légköri túlfeszültségek által kiváltott tranziens-sorozatok esetében kerülhet sor, mert nem elhanyagolható annak a valószínűsége, hogy egy védővezetőbe vagy kombinált oszlopba csapó villám egyidejűleg, vagy jelentéktelen időkülönbséggel okoz visszacsapást nagyfeszültségű, illetve a középfeszültségű rendszerben. A visszacsapás, vagyis zárlat szintén közel egyidőben okozhat automatikus visszakapcsolási ciklust a különböző feszültségszintű rendszerekben, amelyeknek kölcsönhatása komoly következményekkel járhat.

Az egyidőben lezajló tranziensek bemutatására a következő eseménysort analizáltuk szimuláció útján: A 120 és 20 kV-os rendszereket tartalmazó kombinált oszlop közelében villám csap a védővezetőbe, ami a 20 kV-os vezeték mindhárom fázisában és a 120 kV-os vezeték két fázisában zárlatot okoz. Ennek hatására mindkét vezeték háromfázisúan kikapcsolódik. A háromfázisú kikapcsolás hatására a visszacsapási ívek kialszanak, a zárlatok megszűnnek. A 120 kV-os rendszer zárlatmentes fázisán az üzemi feszültség csúcserékével azonos egyenfeszültség marad vissza. A 120 kV-os vezeték visszakapcsolódása feszültség-oppozícióban történik, ami  $300 \text{ kV}_{cs}$  nagyságú kapcsolási túlfeszültséget okoz.

A 20 kV-os vezetéken a háromfázisú kikapcsolódást és a zárlatok megszűnését követően mindhárom fázisban zérus maradna a feszültség, ha nem érvényesülne a 120 kV-os rendszer hatása. A 120 kV-os rendszer tranziense a két rendszer közötti induktív és kapacitív csatolás következtében hatása azonban erőteljes tranzienszt vált ki a 20 kV-os rendszerben, amely nagy valószínűséggel újragyújtja a háromfázisú, nagyáramú zárlati ívek által visszahagyott plazmában az ívet, aminek következtében a 20 kV-os vezetéken feszülteszkaláció indul meg. A leírt, mindkét rendszerre kiterjedő tranziens a zárlat tisztázása szempontjából veszélyesebb, mint a nagyfeszültségű rendszer stacioner üzeme idején a középfeszültségű

rendszerben induló feszültség-eszkaláció. A nagyfeszültségű oldalon lejátszódó tranziens a középfeszültségű rendszerben olyan nagy feszültségcsúcsot okoz, hogy a középfeszültségű zárlati ívből visszamaradt plazma jelentős mértékű deionizációja esetén is komoly esélye van a visszagyújtások bekövetkezésének.

Szimulációs vizsgálattal kimutattuk, hogy a fentiekben leírt, két rendszerre kiterjedő tranziens folyamat okozta veszély elkerülhető a nagyfeszültségű rendszerben létesített egyetlen transzpozícióval.

Kutató munkánk kiterjedt a nagyfeszültségű oszlopközben létesült középfeszültségű oszlopok szigeteléskoordinációjának és ívvédelmének kérdésére is. Megvizsgáltuk emellett azon kombinált vezeték változatokat is, amelyekben a középfeszültségű távvezetékek burkolt vezetőikkel kerülnek megvalósításra. Ennek a konstrukciónak nagy előnye az, hogy a szigetelő burkolattal ellátott távvezetékeknel a fázisok közötti távolság jelentős mértékben csökkenthető a csupasz sodronyos távvezetékekkel előírt fázistávolságához képest, tehát egy kombinált oszlop alsó keresztartóján jóval több középfeszültségű vezeték helyezhető el. Ugyanakkor a kombinált oszlopokra helyezett burkolt vezeték biztonságát minden, a védővezetőbe csapó villám veszélyezteti, ami ellen ívvédelmet kell alkalmazni. A kutatási munkánk egyik eredménye olyan ívvédelmi megoldás kidolgozása, amely a közeli villám által indukált feszültségből eredő zárlatok számát az egyéb megoldásokra számított érték egynegyedére csökkenti. Kimutattuk, hogy a nagyfeszültségű vezeték oszlopközében közbenső, középfeszültségű oszlopok állítása feleslegessé válik, ha a középfeszültségű burkolt vezeték az Amerikában, Ausztráliában, Japánban széleskörűen alkalmazott ASC (Aerial Spacer Cable) konstrukcióval valósítják meg. Ezzel a kombinált távvezeték helyigénye és beruházási költsége jelentősen csökkenthető lenne.

Megvizsgáltuk a kombinált távvezetékek azon változatát is, amelynél az oszlopokra 400 kV-os és 120 kV-os rendszerek vannak felfüggesztve. Megállapítottuk, hogy közös oszlopsoron haladó 400 kV-os és 120 kV-os távvezetékek esetében a 400 kV-os vezeték szintén jelentősen képes befolyásolni a 120 kV-os vezeték egy-, illetve háromfázisú visszakapcsolásának sikerességét azáltal, hogy megnöveli a 120 kV-os rendszerben kialakuló szekunder ív áramát, illetve a szekunder ív kialakulását követő visszaszökő feszültséget. Ez a növelő hatás függ a vezeték közös oszlopsoron való haladásának hosszától, a 400 kV-os, illetve a 120 kV-os rendszer fázisvezetőinek távolságától, általában az oszlopkép topológiájától, illetve a 400 kV-os vezeték szimmetrizálási fokától. A 400 kV-os vezeték bekapcsolt állapotában a 120 kV-os rendszeren lezajló háromfázisú visszakapcsolás holtidejében is létezhet szekunder ív a 400 kV-os rendszerrel való kapacitív és induktív kapcsolat miatt.

A 400 kV-os rendszer visszakapcsoló automatika sikerességét veszélyeztető hatása annál nagyobb,

- minél nagyobb távolságon át halad közös oszlopsoron a két rendszer,
- minél kevésbé szimmetrizált a 400 kV-os rendszer,
- minél kisebb a távolság a két rendszer megfelelő fázisvezetői között.

A kombinált távvezetékek tranzienseivel kapcsolatos kutatási szerződés alapján végzett tevékenységünkhöz csatlakozott egy, a témavezető által irányított doktoranduszi munka is. Közös oszlopsoron haladó 400 kV-os és 120 kV-os távvezetékek a rendszerek közötti csatolásból eredő egyes, az egy-, illetve háromfázisú visszakapcsolás sikerességével kapcsolatos részfolyamatait a témavezető irányításával Danyek Miklós doktorandusz



vizsgálta számítógépes szimulációval, illetve csökkentett feszültségen végzett, koncentrált elemekből alkotott referenciakörben végzett kísérletekkel.

Az erről készült disszertáció többek között beszámolt egy nagyfeszültségű kísérletről, amely a feszültség-eszkaláció reális hálózati körülmények közötti létrejöttét kívánta igazolni. A disszertáció egy olyan kísérleti konfiguráció tervét is tartalmazza, amely módot ad az eszkalációs folyamat ívjelenségeinek részletekbe menő analizisére. Az értekezés elemzi a hálózaton levő egyéb készülékek (pl. tekercselt feszültségváltók) hatását a feszültség-eszkaláció folyamatára és módszert közöl az ív-visszagyújtási energia számítására a zárlati helynek a közös, vagy külön oszlopsoron való elhelyezkedése függvényében. Az értekezés sikeres megvédésével a doktorandusz elnyerte a PhD címet.

*A visszacsapás megelőzése villámcsapásnak nagy gyakorisággal kitett távvezetési oszlopokon*

A jelen beszámoló tárgyát képező kutatás a távvezetési zárlatok megelőzését célozza. Amint az előbbieken kifejtettük, nagyfeszültségű, kompakt vagy kombinált vezetékek zárlatai elsősorban villámcsapások hatására következhetnek be. Mind a nagyfeszültségű, egy vagy többrendszeres, mind pedig a kombinált távvezetékek tartalmaznak a fázisvezetőkbe való közvetlen villámcsapás megelőzésére szolgáló védővezetőket, amelyek megfelelő elhelyezése esetén a közvetlen villámcsapások valószínűsége elhanyagolható. Amennyiben azonban a védővezetőbe, vagy az oszlopcsúcsba villám csap, a fázisvezetőkön visszacsapás keletkezhet. A visszacsapás lényege abban áll, hogy a nagy meredekségű és amplitudójú villámáram az oszlop és az oszlopföldelés impedanciáján olyan feszültségemelkedést képes létrehozni, ami a vonali szigetelőket átíveli. A visszacsapás teljes folyamata bonyolult, mert a szigetelők feszültségigénybevételét befolyásolják a fázisvezetők pillanatnyi feszültsége, a védővezető és a fázisvezetők közötti csatolás, illetve a védővezetőn, a fázisvezetőkön és a hullámvezetőként tekintetbe vett oszlopon kialakuló, többmodusú hullámfolyamatok.

A kutatás ezen részéhez szintén egy, a témavezető irányításával folyó doktoranduszi munka kapcsolódott, amelynek módszereiről és eredményeiről beszámoló értekezés jelenleg a befejezés stádiumában van.

A munka egyik specialitása abban áll, hogy a szigetelők átívelése (a visszacsapás) a bekövetkezésének számítása olyan programmal történt, amely tekintetbe veszi a távvezetési oszlopon kialakuló lököfeszültségnek a szabványostól való lényeges eltérését, tehát az ún. non-standard wave roncsoló hatását a standard wave-vel végzett laboratóriumi próbák eredményeire vezeti vissza. A számítás a hullámfolyamatok szimulációjára szolgáló elektromágneses tranziens program (EMTP-ATP) és a MATLAB program együttműködésével történik. Az átviteli hálózati távvezetékek visszacsapási valószínűségének ilyen, a fizikai folyamatot nagy pontossággal szimuláló meghatározása a szakirodalomban eddig nem fellelhető módszer.

Ezen komplex programmal végzett vizsgálatokkal került megállapításra a visszacsapás valószínűsége, a hazai 400 kV-os átviteli hálózaton jelenleg alkalmazott, illetve szóbajöhető, kompakt konstrukció kialakítására felhasználható szigetelőkkel. A kutatás eredményeképpen olyan görbék születtek, amelyekből kiolvasható a visszacsapás valószínűségének függése a földelési impedanciától (a földelés impedanciájának frekvenciafüggését is tekintetbe véve), a védővezetők számától és az oszlop magasságától. A bemutatott számítási módszerrel kimutatható az oszlopok függőleges, valamint vízszintes irányú méreteinek, továbbá a

kompaktság fokának hatása a visszacsapási valószínűsége. A disszertáció elemzi a hazai átviteli hálózat távvezetékeinek többségénél felhasznált tipikus oszlop és ennél kompaktabb, erre a célra szóbjághető oszlopok gazdaságosságát a visszacsapás valószínűsége alapján.

A visszacsapás bekövetkezésének valószínűsége jelentős mértékben csökkenthető a villámcsapásoknak leginkább kitett (igen magas, kimagasló helyen épült, illetve sziklás (tehát nagy földelési impedanciájú helyen álló) oszlopokra felszerelt túlfeszültség-korlátozókkal. Lehetséges a védővezetőknek vonali túlfeszültség-korlátozókkal való kiváltása is. A kutatás során ezeknek a megoldásoknak a műszaki és gazdasági előnyei is elemzésre kerültek.

*Számítógépes szimuláció kialakítása több, igen nagy feszültségű rendszert tartalmazó, hosszú távvezetékre és a két rendszer elektromágneses transziensei kölcsönhatásainak vizsgálata, elsősorban a két rendszerben egyidőben keletkezett zárlat automatikus likvidálhatósága szempontjából.*

A számítógépes szimulációt az EMTP program ATP verziójának felhasználásával készítettük el. A szimuláció helyességét verifikáltuk a Hévíz – Zserjavinec közötti kétrendszeres, a magyar, illetve horvát villamos energiarendszert összekötő távvezetéken részvételünkkel végzett hálózati kísérletek eredményei alapján. A kísérletek során 37 műveletről, illetve művelet-sorozatról készítettünk regisztrátumokat. Ezek módot adtak arra, hogy a számítógépi modellen a szóbanforgó műveleteket rekonstruálva a mért, valamint számított időfüggvények összehasonlítása alapján korigáljuk a kísérleteket megelőzően készített számítási modellt. A mérési úton kapott időfüggvények lefolyásának, jellegének, kvantitatív jellemzőinek a számítógépi modellen kapott eredményekkel való kellő egyezése bizonyította mind a mérőkörök, mind pedig a szimuláció helyességét. A szimulációval kapott eredményeknek a mért eredményekhez való közelítése (pl. a be- és kikapcsolások pillanatának variálása, a csillapítások összevetése, a kikapcsolt távvezeték kisülési folyamatának elemzése) során fontos megállapításokat lehetett tenni az egyes vezetékparamétereknek, a mögötes hálózatoknak a vizsgált folyamatokra gyakorolt hatását illetően, valamint a szimuláció elemeinek továbbfejlesztésével kapcsolatban, mivel a kísérleti eredmények további szimulációs vizsgálatokkal generalizálhatókká váltak. Ennek fontosságát alátámasztja az a körülmény, hogy a reális távvezetéken az üzembehelyezéskor végzett kísérletek időtartama, tehát a kapcsolási műveletek száma korlátozott. A megszakító-működések időpontja általában véletlenszerű, ezért a pusztán mérési úton nyert eredményekből nem állapítható meg kellő megbízhatósággal a várható igénybevételek lehetséges legnagyobb értéke. Így a kísérleti eredmények nem teszik lehetővé a folyamatok megbízható, statisztikus elemzését. A már hitelesített szimulációval viszont tetszőleges mennyiségben előállítható a mért eredmények extrapolációja.

A szimulációs programba beépítettük az egyfázisú visszakapcsolásnál fontos szerepet játszó szekunder ív modelljét, amelynek helyességét a Hévíz – Zserjavinec távvezetéken végzett nagyfeszültségű, íves kísérletek alapján verifikáltuk azáltal, hogy a szimulációs programmal reprodukálni tudtuk a hálózati kísérletek egyes szakaszainak regisztrátumait. A szimulációs programot, illetve az azzal kapott eredményeket több konferencián ismertettük.

Annak, hogy valamely átviteli hálózati vezeték mindkét rendszerében ugyanazon villámcsapás hatására visszacsapás keletkezik, nem elhanyagolható a valószínűsége. Ez nemcsak számításokkal bizonyítható, hanem az egyfázisú visszakapcsolásnak az utóbbi évtizedben való nagyfokú elterjedésével is. Ha ugyanis a fenti jelenség kizárható lenne,

akkor két, ugyanazon gyűjtősíneket összekötő, azonos oszlopsoron futó rendszerrel elegendő lenne háromfázisú visszakapcsoló automatikát kiépíteni. Az EVA elterjedése az Egyesült Államok, Brazília, Japán, stb. átviteli hálózatain éppen annak tudható be, hogy a csupán HVA-val védett, kétrendszeres vezetékeknél viszonylag gyakran előfordult mindkét rendszer egyidejű kiesése. Fontosnak tartottuk ezért azokat a jelenségeket megvizsgálni, amelyek a két rendszerben egyidejű FN zárlat és így egyidejű EVA működés során kialakulnak. Erre többek között annak megítéléséhez van szükség, hogy egy kétrendszeres átviteli vezeték üzembehelyezés előtti próbája alkalmával az EVA sikerességét milyen hálózati körülmények között célszerű végezni.

A fenti célú számításainkat az EVA sikerességét jelentős mértékben befolyásoló szekunder ívfolyamat két, tipikus szakaszára végeztük el, a Hévíz – Zserjavinec távvezeték paramétereire vonatkozóan.

a. A szekunder ív folyamatos égési intervallumára, amelynek kritikus paraméterei a szinuszos szekunder áram, illetve ezen áram nullaátmetéében bekövetkező visszaszökő feszültség amplituó értékei.

b. A szekunder ív intermittens égési intervallumára, amikor a szekunder ív impulzus jellegű és a visszaszökő feszültség egyenáramú összetevőt tartalmaz. Ezt a folyamatrészt alapvetően befolyásolják a zárlatos fázisban lezajló hullámfizikai folyamatok.

A vizsgálatoknál feltételeztük, hogy a távvezeték két rendszerének táplálása lehetővé teszi, hogy a két rendszer ugyanazon fázisvezetőiben egyszerre játszódhasson le, valamint a két rendszeren hibátlan állapotban átvitt összes teljesítmény: 450 MW.

Az a. szakaszra vonatkozó számításaink kimutatták, hogy abban az esetben, ha mindkét rendszerben egyidőben működik az egyfázisú visszakapcsoló automatika, lényegesen nagyobb a veszélye a szekunder ív hosszú időn keresztül fennmaradásának. Ha csak egyik rendszerben működik az egyfázisú automatika a vizsgált konfigurációban, akkor a lehetséges legnagyobb szekunder íváram  $34.53 A_{cs}$  és a visszatérő feszültség első csúcserőértékének legnagyobb értéke  $124 kV_{cs}$ . Ha mindkét rendszerben egyszerre működik az automatika, akkor a legnagyobb szekunder íváram  $50.25 A_{cs}$ -ra, a legnagyobb visszatérő feszültség pedig  $188.04 kV_{cs}$ -ra adódik. Figyelemreméltó azon eredmény, hogy a két rendszerben egyidejűleg bekövetkező EVA működés legveszélyesebb szekunder íváram és visszatérő feszültség-értékei akkor alakulnak ki, ha mindkét rendszerben ugyanazon fázis a zárlatos.

A szekunder ívfolyamat intermittens szakaszára végzett számításaink kimutatták, hogy ebben az intervallumban a két rendszer kölcsönhatása erősebb, mint a folyamatos ívéges intervallumában. A két rendszer kölcsönhatása itt abban áll, hogy a kisebb szekunder ívárammal és így kisebb visszaszökő feszültséggel jellemezhető fázisban a másik rendszer zárlatos fázisának visszagyújtásai a szekunder ívet fenntartó (illetve időtartamát hosszabbító) hatást keltenek. A kölcsönhatás ellentétes irányban kevéssé érvényesül, mert a tranziens csillapodása következtében az üzemi frekvenciájú feszültség félperiódusa alatt olyan mértékű, hogy nem befolyásolja a következő félperiódusban esedékes visszagyújtás létrejöttét, illetve annak pillanatát.

Az egyfázisú visszakapcsolás sikeressége függ a visszakapcsolási tranziens szigorúságától is, mert ezen tranziens az ív visszagyújtására vezethet. A visszakapcsolási tranziens kölcsönhatását illetően az alábbi megállapításokat tettük:

- Ha a szekunder ív egyik zárlatos fázisban sem aludt ki véglegesen a visszakapcsolást megelőzően, mindkét rendszer visszakapcsolása sikertelen lesz.
- Ha a szekunder ív mindkét zárlatos fázisban kialszik a holtidő vége előtt, akkor a visszakapcsolás mindkét rendszerben eredményes lesz. Meg kell azonban vizsgálni azt, hogy a két zárlatos fázis visszakapcsolási időpontjának némi időkülönbsége a kölcsönhatás következtében nem gyűjhatja-e vissza a zárlatot valamelyik fázisban.
- Ha az egyik rendszerben a visszakapcsolás sikertelen is, a másik rendszerben lehet sikeres. Meg kell azonban vizsgálni, hogy a zárlatos fázis sikertelen visszakapcsolása milyen tranzienszt ébreszt a még vissza nem kapcsolt fázisban. (Ez a kérdés azt feltételezi, hogy a két rendszerben a visszakapcsolás bizonyos mértékű időkülönbséggel jön létre).

*A villamos energiarendszer elektromágneses tranziensei kutatására használt szimulációs módszerek fejlesztése.*

A cím szerinti fejlesztő munka eredményeiről az előző fejezetekben beszámoltunk. Ennek a fejlesztő munkának az eredményei tették lehetővé a különböző típusú többrendszeres, illetve kombinált vezetékeken lezajló folyamatok vizsgálatát, a szekunder ív szimulációjával való számításokat, valamint a visszacsapás vizsgálatánál a non-standard hullámoknak a roncsoló hatás (DE – Disruptive Effect) alapján való összekapcsolását a szakirodalomban fellelhető szigetelési szilárdság értékekkel.