

Петар Вукелја,
Радомир Наумов,
Јован Мрвиќ,
Електротехнички институт "Никола Тесла", Београд
Ристо Миновски, Електротехнички факултет, Скопје



MK0300042

ПРИВРЕМЕНИ ПРЕНАПОНИ ВО МРЕЖИТЕ ОД ВИСОК НАПОН

СОДРЖИНА

Во трудов се разгледани привремените пренапони кои можат да се појават во високонапонските мрежи како последица на споеви со земја, нагли растеретувања, неполнофазни режими на работа и комутациони операции. Врз база на нивната анализа и согледување на конфигурациите во кои што се појавуваат, дадени се мерки за нивно ограничување или елиминирање.

Клучни зборови: привремени пренапони, мрежа, спој со земја, растоварување

ABSTRACT

This paper is treating the temporary overvoltages that may arise in the high voltage networks as a result of: ground faults, loss of load, loss of one or two phases and switching operation. Based on the analysis, the measures for their limitation have been proposed.

Keywords: Temporary overvoltages, network, ground fault and loss of load

1 ВОВЕД

Привремените пренапони претставуваат непридушени или слабо придушени пренапони од осцилаторен карактер и релативно долго траење. Нивната фреквенција најчесто е блиска со фреквенцијата на мрежата, меѓутоа може да биде и неколку пати помала или поголема од нејзе. Тие можат да доведат до значителни напрегања на изолацијата, потоа до термички преоптоварувања и оштетувања на одводниците за пренапони без искришта, термички напрегања на напонските и енергетските трансформатори, отежнато прекинување на придружната струја и оштетување на одводниците за пренапони со искришта и др.

Привремените пренапони најчесто можат да се појават као последица на споеви со земја, нагли растеретувања на мрежата, неполнофазни режими на работа и комутациони операции.

Во трудот се презентирани привремените пренапони кои настанале во високонапонските мрежи за време на експерименталните истражувања на пренапоните. Прес-

метките на привремените пренапони се извршени во определени карактеристични конфигурации на мрежата со користење на програмскиот пакет ATP-EMTP

2 ПРИВРЕМЕНИ ПРЕНАПОНИ ПРИ ПОЈАВАТА НА СПОЈ СО ЗЕМЈА

Еднофазниот спој со земја е една од најчестите грешки во ЕЕС. Со неговата појава се пореметува системот на фазните напони, односно доаѓа до трајно зголемување на амплитудата на фазните напони. Трајните зголемувања на фазните пренапони над вредностите кои постоеле пред настанувањето на спојот со земја представуваат привремени пренапони и тие се задржуваат во мрежата се додека спојот со земја не нестане. Нивниот износ зависи од начинот на заземјувањето на неутралната точка на мрежата.

Истражувањата на привремените пренапони при појавата на спој со земја се вршени пресметковно и експериментално во мрежите од 6 до 400 kV. Не се извршени многу експериментални истражувања во 110, 220 и 400 kV мрежи, бидејќи постоела опасност од нежелни последици кои можат да настанат во ЕЕС за време на спојот со земја. Најчесто тоа е правено пред пуштањето во експлоатација на новоизградени делови од ЕЕС, како и во експлоатацијата. Спојот со земја е изведувачан на 110, 220 и 400 kV водови обично неколку km од трансформаторската станица (ТС), а напоните се снимани во ТС. Изведени се 9 намерно предизвикани споеви со земја (2 на 110, 4 на 220 и 3 на 400 kV водови).

Напоните на здравите фази спрема земја на собирниците во ТС се најчесто пониски од напоните пред да се појави спој со земја, а по исклучувањето на спојот со земја тие се враќаат на првобитните вредности. Напонот на фазата на која се појавил спој со земја за време на неговото траење е од неколку проценти до неколку десетина проценти од напонот пред појавата на спојот со земја во зависност од местото каде настанал спојот со земја на водот.

Во 6, 10 и 35 kV мрежи извршен е голем број на експериментални истражувања на привремените пренапони при појавата на спој со земја. Спојот со земја е предизвикуван со вклучување на прекинувачот на водот на кој претходно е направен метален спој со земја на една фаза, а во мрежите со изолирана неутрална точка спојот со земја е предизвикуван со приближувањето на заземјен метален дел на еден од фазните спроводници на мрежата ([1,7]).

Во сите тие мрежи напоните на здравите фази за време на траењето на спојот со земја добивале приближно вредности на меѓуфазните напони, а фазата на која што бил спојот со земја напон приближно еднаков на нула (спојот со земја е изведувачан на почетокот од водот).

Извршен е поголем број на пресметки на оптеретени и неоптеретени 110, 220 и 400 kV водови. Местото на спојот со земја е варирано вдоль водот. Кај оптеретените водови најголемите привремени пренапони се јавуваат околу половината на водот при појава на спој на земја на истото место. Померувајќи го спојот со земја кон краевите на водот висината на привремените пренапони на водот опаѓа. Најголемите привремени пренапони кај неоптоварените водови се јавуваат на нивниот отворен крај при појава на спој со земја на истото место, а поместувајќи го местото на спојот со земја кон почетокот од водот се намалуваат. Амплитудите на напонот на собирниците од изворот при спојот со земја на оптеретениот или неоптеретениот вод се блиски на амплитудите на напонот пред настанување на спојот со земја.

Во сите наведени случаи максималниот износ на привремените пренапони не е поголем од 1,4 р.у. ([3]).

Пресметките на пренапоните во мрежите со изолирана неутрална точка покажале дека привремените пренапони при појава на спој со земја се еднакви на меѓуфазните напони. Тоа е најчест случај и за мрежите заземјени преку придушница за компензација на

струјата на спојот со земја. За мрежи заземјени преку отпорник привремените пренапони при појава на спој со земја можат да ги надминат меѓуфазните пренапони, нивните вредности, зависат како од соодветните еквивалентни реактанси така и од отпорноста на отпорникот за заземјување на неутралната точка.

3 ПРИВРЕМЕНИ ПРЕНАПОНИ ПРИ НАГЛО РАСТОВАРУВАЊЕ

Наглото растоварување во ЕЕС представува непланирана промена на тековите и балансот на моќностите во тој систем. Настанува како последица на исклучување на големите потрошувачи, испад на јако оптеретени надземни водови и трансформатори, или настанување и исклучување на куса врска. Се разликуваат два типови на нагло растоварување и тоа растоварување во ЕЕС и растоварување на генератор (кога е исклучена потрошувачката во непосредната близина на генераторот).

Наглото растоварување на генераторот го карактеризира еден транзиентен процес, кој главно се одвива во периодот од неколку ms после испадот на потрошувачот и еден подолг процес на зголемување на напонот во генераторот и во блиските јабли на ЕЕС кој следи после тоа. Овој подолг процес трае од неколку стотици ms до неколку s, заради што пренапоните при нагло растоварување се сврстуваат во привремени пренапони. Траењето на привремените пренапони при нагло растоварување директно зависи од брзината на дејствувањето на автоматскиот регулатор на напонот.

Придружната појава на наглото растоварување на генераторот е и порастот на брзината на вртењето на генераторот што како последица има и зголемување на фреквенцијата на напонот на неговите изводи. Турбогенераторите можат да се забрзат и до 10% над номиналната брзина во текот на една s, а после тоа забрзувањето опаѓа поради дејството на турбинскиот регулатор. Заради значително поспорото влијание на регулаторот врз работниот флуид, порастот на брзината на хидрогенераторот е значително поголем при наглото растоварување, кои што можат да се забрзат и до 60% над номиналната брзина во текот на неколку s.

Зголемувањето на напонот во системот зависи од односот на реактивната моќност пред испадот и привидната моќност на генераторот. Во колку тој однос е поголем, пренапоните се поголеми.

Експериментални истражувања се вршени во ХЕ "Ѓердап 1" и ХЕ "Ѓердап 2", при нагло растоварување на еден од генераторите, за различни карактеристични оптоварувања, овие покажале дека привремените пренапони не преминале вредности од 1,14 p.u. Во текот на експерименталните истражувања на 400 kV вод "Ниш - Крагуевац" после спроведување на споеви со земја дојде до привремени пренапони кои не спаѓаат во привремените пренапони при траењето на спојот со земја бидејќи настапиле кога истиот е исклучен ([2]). Наиме, при исклучување на првиот спој со земја на фазата "8" на 400 kV вод "Ниш - Крагуевац", неколку km од ТС "Крагуевац 2" напоните на двете здрави се вратиле на вредностите кои ги имале пред спојот со земја, за да после тоа со еднополниот АПВ на водот пораснале за околу 20%. Тоа истото се случува и со напонот на фазата "8" кој добива вредност како фазите "0" и "4". Оваа појава довела до реагирање на пренапонската заштита на водот која триполно го исклучила водот "Ниш - Крагуевац" во ТС "Ниш 2" и ТС "Крагуевац 2". По исклучување на вториот спој со земја, кој е воспоставен на фазата "0" на водот неколку km до ТС "Ниш 2", напоните на здравите фази пораснуваат за околу 20% од вредноста на напонот пред настанување на спојот со земја. Со еднополно АПУ во ТС "Ниш 2" и напонот на фазата "0" добива ист напон како на фазите "4" и "8" и дури со еднополно АПВ во ТС "Крагуевац 2" напоните на овие фази се враќаат на вредности на напоните пред настанување на спој со земја. Оваа појава останала неразјаснета, меѓутоа се претпоставува дека настанала како последица на работата на генераторот во слаба мрежа

Пресметките на привремените пренапони при наглото растоварување е извршен на потегот ХЕ "Ѓердап 1" - ТС "Београд 8" ([4,6]) Разгледани се повеќе настани кои ги предизвикуваат овие пренапони и тоа. испад на автотрансформаторот 400/220/31,5 kV во ТС "Београд 8", триполна куса врска на собирниците ТС "Београд 8" и испад на ТС, триполна куса врска на средина од 400 kV вод "Ѓердап 1 - Београд 8" и испад на водот, исклучување на оптоварениот 400 kV вод "Ѓердап 1 - Бор 2" со прекинувач во РП "Ѓердап 1" и потполно растоварување на ХЕ "Ѓердап 1" Ово е направено за случај регулаторот на напон да биде нагоден на нормална вредност и кога дејствува многу споро Најголемите пренапони при нагло растоварување не ја преминувале вредноста 1,25 p.u., кога регулаторот на напон дејствува нормално. При споро дејствување на регулаторот (не се користи во експлоатација) напоните постепено растат и после 3,5 s достигнуваат вредност 1,4 p.u. со тенденција на понатамошен пораст

4 ПОЈАВА НА ФЕРОРЕЗОНАНЦИЈА

Ферорезонантните осцилации припаѓаат на привремените пренапони Карактеристични се за мрежи со изолирана неутрална точка, меѓутоа можат да се сретнат и во некои конфигурации на мрежи со друг третман на неутралната точка.

Во мрежите со изолирана неутрална точка можат да се појават фазни напони повисоки од нормалните во вид на стационарни периодични осцилации, кои можат да доведат до пробив на изолацијата или почесто до термичко напрегање на поедините елементи на мрежата. Осцилациите се засниваат на меѓусебното дејство на дел од капацитивноста на мрежата и нелинеарната индуктивност на намотките на енергетскиот трансформатор или почесто нелинеарната индуктивност на еднополно заземјените индуктивни напонски трансформатори Осцилациите кои се базираат на меѓусебното дејство на делот од капацитивноста на мрежата и нелинеарната индуктивност на намотките на енергетскиот трансформатор главно се поврзани со неполнофазните режими на работа. Се викаат ферорезонантни осцилации, а појавата *ферорезонанција*.

Мрежите со изолирана неутрална точка можат да имаат во исти услови (не истовремено) две потполно различни трајни состојби спрема земја: нормална и ферорезонантна состојба со фазни напони значително поголеми од нормалните Бидејќи потрошувачите се приклучени на меѓуфазни напони кои се стабилни, нормално работат без разлика на состојбата на мрежата спрема земја. Преминот од една состојба на мрежата во друга предизвикуваат преодни процеси кои настануваат при преоден спој со земја, комутациони операции и сл.

Истражувањата во систем и на модели покажале дека постојат ферорезонантни осцилации со различни фреквенции; најчесто се среќаваат осцилации со

- триструка фреквенција (трета хармониска ферорезонанција),
- приближно двострука фреквенција на мрежата (втора хармониска ферорезонанција),
- фреквенција на мрежата (ферорезонанција со мрежна фреквенција),
- приближно половина од фреквенција на мрежата (втора субхармониска ферорезонанција)

Истражувањата на ферорезонантните осцилации во мрежите со изолирана неутрална точка вршена е и пресметковно и експериментално ([1,2,7]) Анализата на резултатите од пресметките го потврдиле оно што е утврдено и со експерименталните истражувања Констатирано е следното

- Најчесто се појавува втората субхармониска ферорезонанција со напони спрема земја 1,7 - 2,1 p.u., и таа, најчесто настанува после нестанување, односно исклучување на спојот со земја или како последица на комутациони операции на прекинувачот во мрежата Фреквенцијата на нејзините осцилации не е точно двострука помала од фреквенцијата

на мрежата. Тоа се отчитува во осцилирањето на фазните напони. Фреквенцијата на осцилирањето е обично неколку Hz. Во процесот на ферорезонанцијата учествуваат подеднакво сите три фази.

- При вклучување на неоптеретени енергетски трансформатори, кои ја напојуваат мрежата со изолирана неутрална точка, се појавуваат ферорезонантни осцилации на неговата секундарна страна. Тоа е најчесто втората хармониска ферорезонанција со напони спрема земја 2,5 - 3,6 р.и, а се среќава и трета хармониска со напони спрема земја 2,7 - 3,7 р.и. Обете настануваат во мрежи со мала капацитивност спрема земја. Кај другата хармониска ферорезонанција освен вториот хармоник е присутен и хармоникот чија што фреквенција може да биде од неколку Hz до 25 Hz. Кај третата хармониска ферорезонанција фреквенцијата е еднаква на триструктата фреквенција на мрежата.

За време на експерименталните истражувања е утврдено дека многу често причина за настанување на ферорезонанцијата била неадекватноста на карактеристиките на напонските трансформатори. За мрежи со изолирана неутрална точка, кај кои заштитата не го исклучува спојот со земја, напонските трансформатори мораат да имаат коефициент на напонот 1,9. Меѓутоа, доста често во такви мрежи биле присутни напонски трансформатори со фактор на напонот 1,2. Со такви напонски трансформатори појавата на пренапони или малите зголемувања на работниот напон можат да доведат до појава на ферорезонанција.

Во најголем број на случаи во текот на експерименталните истражувања, кога се појавиле ферорезонантни осцилации, применета е мерка за нивно отклонување - приклучување на отпорник на краевите од триаголникот на секундарните намотки на гарнитурата напонски трансформатори. Со примена на овие мерки ефикасно се отклонувале ферорезонантните осцилации. Вредностите на отпорноста на отпорникот со кои тоа се постигнувало изнесувале во некои случаи и стотина Ω , меѓутоа најчесто од 20 до 40 Ω . Поефикасно придушвање се постигнувало во колку отпорноста на отпорникот била помала. Меѓутоа, малите вредности на отпорноста можат да предизвикат престопавање на напонските трансформатори за време на траењето на спојот со земја.

5 ПРИВРЕМЕНИ ПРЕНАПОНИ ПРИ НЕПОЛНОФАЗНИ РЕЖИМИ НА РАБОТА

Во текот на работата на ЕЕС се појавуваат во поедини негови делови, вистина ретко, неполнофазни режими на работа. Тие главно се елиминираат со дејството на заштитата, меѓутоа се случува и да се задржат. Причина за нивното настанување се невклучувањето на еден или два пола на прекинувачот во процесот на вклучувањето, неисклучување на еден или два пола на прекинувачот во процесот на исклучувањето и прекин на фазниот спроводник. Во такви ситуации во делови од системот, каде што тоа се случило, може да дојде до појава на резонантни и ферорезонантни осцилации, односно привремени пренапони. Истите се разгледувани при неполнофазни режими на работа во повеќе различни конфигурации вод - неоптеретен енергетски трансформатор ([2,5])

Неполнофазниот режим на работа доведувал до појава на резонантни, односно ферорезонантни осцилации во зависност од тоа дали е уважувана или на нелиенарноста на карактеристиките на магнетизиње на трансформаторот. Осцилациите се појавувале на фазата или на фазите кои биле исклучени и нивната големина во некои случаи надминувала 3 р.и. Поголема е можноста да се појават привремени пренапони при неполнофазен режим на работа во мрежи со изолирана неутрална точка одколку во мрежи со друго третирање на неутралната точка. Нивната појава, како и нивната величина, зависи од спрегата на капацитивноста на водот и нелинеарната индуктивноста на енергетскиот трансформатор. Присуството на потрошувач ги намалува привремените пренапони или ја оневозможува нивната појава. Овакви конфигурации можат да се појават во текот на формирањето на

мрежата, со дејството на заштитата во текот на нејзината нормална работа или кога ќе се појави грешка (прекин на фазниот спроводник со или без спој со земја)

Во една карактеристична конфигурација на мрежата е разгледана можноста за појава на пренапони кои се јавиле како последица на два настани и тоа појава на неполнофазен режим на работа во 110 kV мрежа (невклучување или неисклучување на еден односно на два пола на 110 kV прекинувач) и дејството на автоматскиот регулатор на напон на енергетскиот трансформатор ($110 \pm 10 \times 1,5\%$)/35/10,5 kV кој напојува 35 kV мрежа ([2]) Овие два настани со постојните решенија за регулација на напонот на трансформаторот (информација за состојбата на напонот се зема од напонските трансформатори на ниво на 35 kV, односно се зема податок за вредноста на само еден меѓуфазен напон) може да доведат до зголемување на напонот во 35 kV мрежа Ово зголемување на напонот се проследува на 10 kV мрежа, а од таму и на мрежата 0,4 kV На тој начин во 0,4 kV мрежа можат да се појават привремени пренапони опасни за потрошувачите

Појавата на долготрајни високи пренапони во разгледуваните конфигурации, како последица на неполнофазните режими на работа, може да биде опасна за изолацијата на опремата и затоа таквите режими треба што побрзу да се елиминираат

6 ЗАКЛУЧОК

Врз основа на анализата на привремените пренапони и согледувањето на конфигурациите во кои се појавуваат може да се заклучи следното:

- Привремените пренапони можат да бидат многу високи и опасни за изолацијата на опремата на ЕЕС.

- Во мрежи со директно заземјување на неутралната точка (фактор на спој со земја $< 1,4$) има најмали можности за настанување и одржување на високи привремени пренапони.

- Мрежите со изолирана неутрална точка се исклучително склони за развој и одржување на високи привремени пренапони. Со заземјување на нивната неутрална точка преку отпорник се намалува нивото и веројатноста за нивно појавување.

- Постојните мрежи со изолирана неутрална точка треба да се заштитат од можноста за појава на ферорезонанција Од повеќето можни се препорачува едноставна и ефикасна мерка - вклучување на отпорник помеѓу краевите на отворениот триаголник на секундарните намотки на гарнитурата на еднополно заземјени индуктивни напонски трансформатори

- Спојот со земја во мрежите со изолирана неутрална точка пожелно е да се исклучува веднаш после неговото настанување, ако тоа го дозволува технологијата на производството

- Веројатноста за појава на неполнофазни режими (прекини на спроводници и откази на функционирање на еден или два пола на расклопниот апарат), како и нивното траење, треба да се сведи на минимум Ово е во непосредна врска со квалитетот на одржувањето на постројката а посебно на комутационата опрема, како и на релејната заштита

- За време на траењето на неполнофазните режими, одводите за напојување на потрошувачите на секундарната страна на трансформаторот не треба да се исклучуваат туку неполнофазниот режим на работа да се отклони што порано, со исклучување на прекинувачот во напојниот вод кој го предизвикал овој режим

- Заради скратување на времето на траење и амплитудата на привремените пренапони при нагли растеретувања потребно е да се користат брзи регулатори на напон на генераторите

- За големи или значајни трансформаторски станици и разводни постројки, потребно е да се вршат детални анализи на привремените пренапони за сите очекувани переругу-

ларни состојби, за да врз основа на истите се избераат оптимални мерки за отклонување или ограничување на привремените пренапони

ЛИТЕРАТУРА

- [1] P Vukelja, R Naumov, M Vučinić, P Budišin "Experimental investigation of overvoltages in neutral isolated networks" IEE Proceedings - C, Vol 140, No 5, September 1993, 343 - 350
- [2] Z Zdravković, P Vukelja, R Naumov, G Drobnyak, J Mivić i drugi "Kvazistacionarni (privremeni) prенапони u mrežama visokog napona" Studija br 329401 Institut "Nikola Tesla" Beograd, 1994
- [3] P Vukelja, G Drobnyak, J Mivić Privremeni prенапони pri zemjospoju u direktno uzemljenim mrežama visokog napona IUKO CIGRE STK 33 Zbornik radova kolokvijuma "Privremeni prенапони u mrežama visokog napona " Beograd 1994, 20 - 28
- [4] G Drobnyak, I Mivić Privremeni prенапони pri naglom rasterećenju IUKO CIGRE STK 33 Zbornik radova kolokvijuma "Privremeni prенапони u mrežama visokog napona " Beograd 1994, 29 - 35
- [5] P Vukelja, G Drobnyak, J Mivić Privremeni prенапони pri nepunofaznim režimima rada u konfiguracijama vod - neopterećeni transformatori IUKO CIGRE STK 33 Zbornik radova kolokvijuma "Privremeni prенапони u mrežama visokog napona " Beograd 1994, 45 - 52
- [6] G Drobnyak, I Mivić Privremeni prенапони pri naglom rasterećenju HE "Đerdap 1" 22 savjetovanje IUKO CIGRE Vrnjačka Banja, 21 - 25 maj 1995, R 33 -04, str 8
- [7] P Vukelja, R Naumov, G Drobnyak, J Mivić Privremeni prенапони u elektroenergetskom sistemu ESP 22 savjetovanje IUKO CIGRE Vrnjačka Banja, 21 - 25 maj 1995, R 33 -03, str 8