

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
“ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ”**

СЕРДЮКОВ РОМАН ПЕТРОВИЧ

УДК 621.316

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ЗАХИСТУ ТА ОБМЕЖЕННЯ ПЕРЕНАПРУГ
В МЕРЕЖАХ 6-10 КВ ПРИ ЗАМИКАННЯХ ФАЗИ НА ЗЕМЛЮ**

Спеціальність 05.14.02 – Електричні станції, мережі і системи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Донецьк-2013

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» Міністерства освіти і науки України, м. Донецьк

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Сивокобиленко Віталій Федорович,
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри «Електричні станції», м. Донецьк .

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор
Вепрік Юрій Миколайович,
ДВНЗ Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри «Передача електричної енергії»,
м. Харків;

доктор технічних наук, професор
Саєнко Юрій Леонідович,
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри «Електрифікація промислових
підприємств», м. Маріуполь.

Захист відбудеться " 24 " жовтня 2013 р. о 13³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 11.052.02 в ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, 8-й навчальний корпус, ауд. 8.514.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» за адресою 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, 2-й навчальний корпус.

Автореферат розісланий " ____ " вересня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д11.052.02, к.т.н., доц.

А.М Ларін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На даний час електричні мережі 6-10 кВ набули широкого розповсюдження на промислових підприємствах, в системах власних потреб електростанцій, в міських мережах і вони в значній мірі визначають надійність функціонування цих об'єктів.

Основною перевагою таких мереж є те, що при їх роботі з ізольованою або частково заземленою нейтраллю вони можуть працювати на протязі кількох годин при виникненні однофазних замикань фази на землю (ОЗЗ). Недоліком цих мереж є ушкодження електрообладнання через високий рівень перенапруг при дугових замиканнях на землю, а також труднощі забезпечення селективного спрацювання релейного захисту, особливо при малому рівні струмів замикання фази на землю. Підвищенню надійності роботи цих мереж постійно приділяється увага як з боку науково-дослідних і експлуатаційних організацій, так і заводів-виробників електрообладнання. Так, впроваджуються резистивне заземлення нейтралі, сучасні мікропроцесорні захисти, обмежувачі перенапруг (ОПН) на основі оксидно - цинкових резисторів. Проводяться роботи по дослідженню перехідних процесів в цих мережах як з використанням сучасних цифрових регістраторів, так і методами математичного моделювання.

Вагомий внесок у підвищення надійності роботи цих мереж зробили як вітчизняні, так і закордонні вчені: Стогній Б.С., Сирота І.М., Назаров В.В., Журахівський А.В., Сабодаш І.А., Вепрік Ю.М., Саєнко Ю.Л., Ліхачов Ф.А., Беляков М.М., Кадомська К.П., Шалін О.І., Євдокунін Г.А. та ін., а також наукові колективи відомих організацій (ІЕД НАН України, КПІ, ДонНТУ, ЛПІ, НПІ, ХПІ та ін.). Проте надійність роботи зазначених мереж залишається ще недостатньою. Так, наприклад, в системі власних потреб теплових електростанцій Донбасенерго і Східенерго ушкоджується по 3-5 асинхронних двигунів великої потужності за рік, а на підстанції Докучаєвського флюсо-доломітного комбінату (ФДК) виникає у середньому 15 неселективних відключень фідерів 6 кВ за місяць.

Тому актуальним є проведення подальших досліджень для підвищення надійності роботи мереж 6-10 кВ при ОЗЗ за рахунок вдосконалення методів математичного моделювання цих мереж, резистивного заземлення нейтралі, обмеження перенапруг та підвищення чутливості і селективності дії релейного захисту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота відповідає науковому напрямку кафедри електричних станцій ДонНТУ і виконувалась відповідно до плану науково-дослідних робіт МОН України у рамках держбюджетної теми Д-9-03 “ Розвиток теорії і методів обмеження перенапруг в електричних системах при дугових замиканнях фази на землю ”(№ ДР 0103U001467), в якій здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і завдання досліджень. Мета роботи – підвищення надійності функціонування мереж 6-10 кВ при ОЗЗ за рахунок обмеження перенапруг і підвищення чутливості релейного захисту.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні завдання:

- удосконалити математичну модель мережі 6-10 кВ для аналізу перехідних процесів при ОЗЗ з урахуванням асинхронного двигунного навантаження, нелінійних характеристик ОПН, приєднувальних і вимірювальних трансформаторів, міжфазних взаємних індуктивностей та ємностей приєднань, опору ізоляції відносно землі;

- виконати дослідження перехідних процесів при ОЗЗ в мережах з ізолюваною і резистивно заземленою нейтраллю та удосконалити методи резистивного заземлення мереж;

- розробити метод обмеження тривалості дугових замикань в мережах при ОЗЗ;

- розробити метод підвищення чутливості і селективності дії захисту від ОЗЗ;

- розробити автоматичну систему керування резистивним низьковольтним заземленням нейтралі та шунтування uszkodженої фази.

Об'єкт дослідження - процеси в електричних мережах 6-10 кВ при ОЗЗ.

Предмет дослідження - перехідні процеси при ОЗЗ, методи обмеження перенапруг та підвищення чутливості релейного захисту від ОЗЗ мереж 6-10 кВ.

Методи досліджень. Теоретичні дослідження базуються на основних положеннях теорії перехідних процесів в електричних системах, теорії перехідних процесів в трансформаторах і електричних машинах змінного струму, методах математичного моделювання і чисельного розв'язання нелінійних систем алгебраїчних і диференціальних рівнянь, основних положеннях релейного захисту електричних мереж.

Наукова новизна отриманих результатів:

- отримала подальший розвиток математична модель для дослідження перехідних процесів в мережах 6-10 кВ при ОЗЗ на основі диференціальних рівнянь її елементів, яка відрізняється врахуванням рівнянь магнітно-зв'язаних статорних і роторних контурів асинхронних двигунів, обмоток приєднувальних трансформаторів з заземлюючим резистором, нелінійних обмежувачів перенапруг та комутаторів для шунтування uszkodженої фази з їх системою керування;

- вперше розроблено комбінований метод обмеження перенапруг, в якому виключення ескалації напруги досягнуто за допомогою керованого низьковольтного резистивного заземлення нейтралі, а скорочення дії дугових замикань забезпечується шунтуванням uszkodженої фази при ОЗЗ;

- удосконалено метод підвищення чутливості захисту приєднань при замиканнях фази на землю шляхом підсилення магнітно-рушійної сили в трансформаторах струму нульової послідовності uszkodжених приєднань та її послаблення в трансформаторах неушкоджених приєднань завдяки подачі через ємність напруги нульової послідовності на допоміжні обмотки трансформаторів струму.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблена математична модель електричної мережі дозволяє досліджувати перехідні процеси при глухих і дугових замиканнях на землю та їх вплив на параметри мережі, а також знаходити для мереж оптимальні значення високовольтного або низьковольтного резистивних заземлень нейтралі;

- запропонований метод захисту від ОЗЗ дозволяє підвищити коефіцієнт чутливості захисту до нормативних значень в мережах 6-10 кВ з малими струмами замикання на землю, у тому числі і в режимах з мінімальною кількістю приєднань, наприклад, коли енергоблок електростанції знаходиться в режимі пуску або зупинки;

- методика вибору параметрів і спосіб використання низьковольтного резистивного заземлення нейтралі замість високовольтного дозволяє знизити затрати на його придбання та експлуатацію при такому ж рівні обмеження перенапруг;

- комплексна система, в якій використано автоматичне шунтування ушкодженої фази (АШП) і кероване низьковольтне резистивне заземлення нейтралі, вирішує проблему обмеження перенапруг і підвищення чутливості релейного захисту. Ефективність цієї системи підтверджена впровадженням на Докучаєвському ФДК та Зуєвській ТЕС.

Отримані наукові та практичні результати дисертаційної роботи рекомендуються до використання проектними та експлуатаційними організаціями для розрахунку і дослідження перехідних процесів в мережах 6-10 кВ при ОЗЗ, а також при обґрунтуванні експлуатаційних параметрів технічних засобів обмеження величини і тривалості дії електромагнітних перехідних процесів в режимах, що небезпечні для електрообладнання промислових підприємств.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, що містяться у дисертації, отримані здобувачем самостійно і полягають у вирішенні науково-практичної задачі підвищення надійності роботи мереж 6-10 кВ при замиканнях фази на землю, аналізу перехідних процесів, що мають місце при однофазних замиканнях на землю. Проведено математичне моделювання перехідних процесів з урахуванням роторних контурів асинхронних двигунів та приєднувальних трансформаторів заземлення нейтралі, взаємних індуктивностей фаз електричної мережі. Здобувач розробив математичну модель, алгоритм і програму моделювання вказаних вище режимів, виконав теоретичні і експериментальні дослідження та узагальнив отримані дані. Запропонував спосіб використання низьковольтного резистивного заземлення нейтралі замість високовольтного і спосіб підвищення коефіцієнта чутливості захисту від ОЗЗ до нормативних значень в мережах 6-10 кВ з малими струмами замикання на землю.

Апробація результатів роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на 10-тій науково-техничній конференції «Проблеми сучасної електротехніки» (Київ-2010р.), на 17-тій міжнародній науково-техничній конференції «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» (Харків, 2010р.), на II міжнародній конференції молодих вчених EPECS-2010 «Енергетика і системи управління» (Львів, 2010р.), на міжнародній науково-техничній інтернет-конференції «Перспективні іновaції в науці, освіті, виробництві і транспорті» (Одеса, 2010р.); на 5-тій міжнародній науково-техничній конференції «Керування режимами роботи об'єктів електричних і електромеханічних систем» (Донецьк, 2011р.); на науково-техничних семінарах кафедри «Електричні станції» ДонНТУ (Донецьк, 2008 - 2012 рр.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 9 наукових праць, з яких 6 статей у наукових фахових виданнях України, 2 статті опубліковано в матеріалах міжнародних конференцій, одна з яких входить до наукометричної бази даних РІНЦ (російський індекс наукового цитування).

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновку, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг дисертації складає 192 сторінки, з них 138 сторінок основного тексту, 36 рисунків по тексту, 24 на окремих сторінках; 8 таблиць, 4 додатки на 10 сторінках; 170 найменувань використаних джерел на 20 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Стан питання по обмеженню перенапруг і вдосконаленню захистів при однофазних замиканнях і задачі досліджень» проведено аналітичний огляд науково-технічної літератури за темою роботи, вибрано напрямки досліджень, проаналізовані сучасні методи моделювання перехідних процесів у мережах з ізольованою нейтраллю, методи обмеження перенапруг, стан сучасного релейного захисту від ОЗЗ та методи підвищення його чутливості і селективності, сформульовано основні завдання досліджень.

У другому розділі «Розробка математичної моделі для аналізу перехідних процесів в системі електропостачання 6-10 кВ при замиканнях фази на землю» розглянуто математичні моделі основних елементів: кабельної (повітряної) мережі, асинхронного двигуна, трансформатора та ОПН.

Для цих елементів вибрані відповідні схеми заміщення і записані диференціальні рівняння у природній $(a, b, c, 0)$ системі фазних координат, а в якості невідомих прийняті струми індуктивних і напруги ємнісних елементів. Кожну фазу трифазної повітряної, або кабельної ЛЕП розглянуто у вигляді Π – образної схеми заміщення з поперечними R, C параметрами в початковому і кінцевому вузлах та з електро-рушійною силою (ЕРС) $e(t)$ і R, L поздовжними параметрами. Мережа живлення представлена параметрами трансформатора, а навантаження – параметрами асинхронних двигунів (АД). Диференційні рівняння, наприклад, для однієї фази A між початковими і кінцевими вузлами трифазної мережі при наявності взаємно-індуктивного зв'язку M поміж фазами (рис. 1) будуть мати вигляд:

$$e_A = R_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt} + U_H - U_K; \quad (1)$$

$$C_H \frac{dU_{CH}}{dt} = i_H - \frac{U_{CH}}{R_{CH}}; \quad (2)$$

$$C_K \frac{dU_{CK}}{dt} = i_K - \frac{U_{CK}}{R_{CK}}, \quad (3)$$

Розв'язання цих рівнянь доцільно проводити неявними методами, які, на відміну від явних, забезпечують більш високу чисельну стійкість рішення. Для

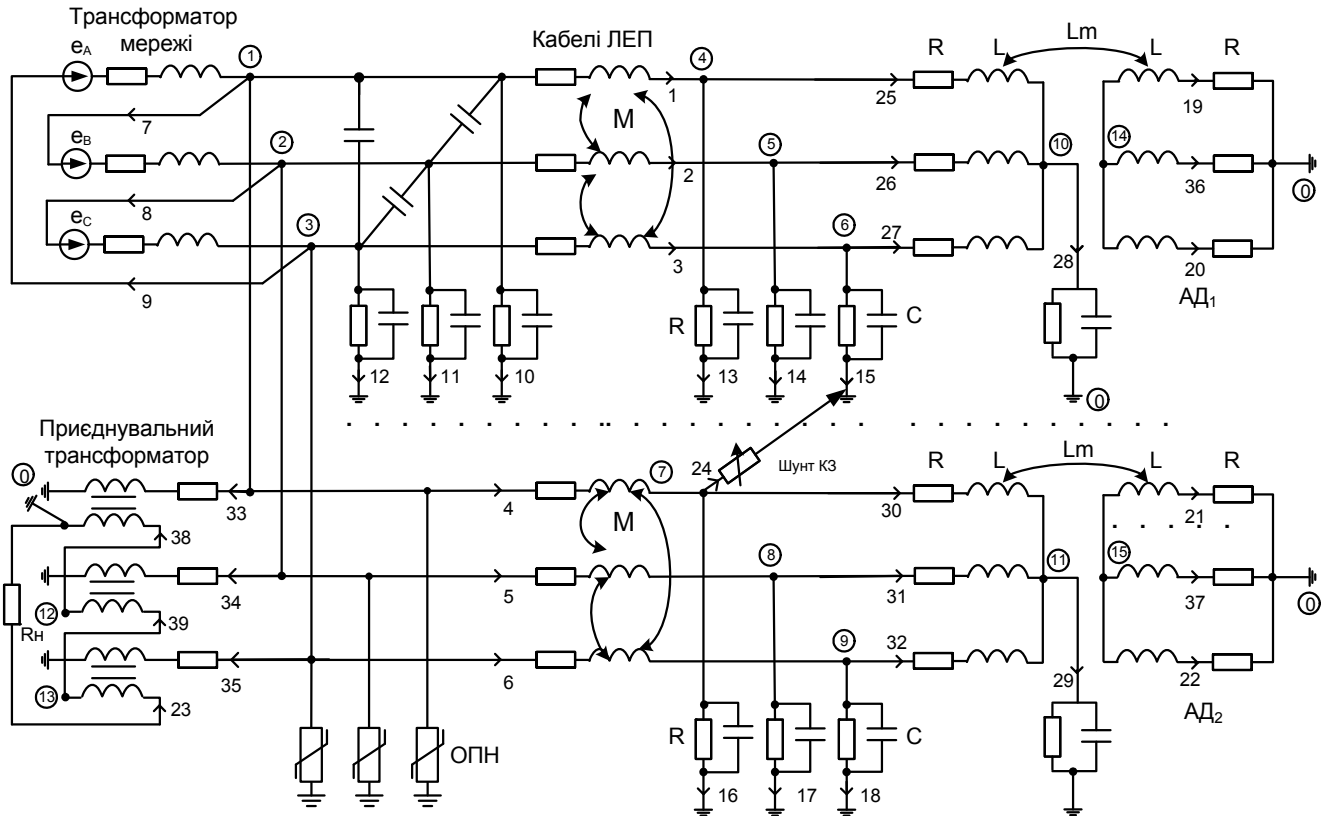


Рисунок 1. Розрахункова схема заміщення мережі 6 кВ для аналізу процесів замикання фази на землю

цього замінемо в рівняннях (1)-(3) похідні поліномами m -ого порядку за допомогою формул диференціювання назад (ФДН):

$$\left(\frac{d\vec{y}}{dt}\right)_{k+1} = \frac{1}{h} \cdot a_0 \cdot \vec{y}^{k+1} + \frac{1}{h} \cdot \sum_{s=1}^m a_s \cdot \vec{y}^{k+1-s}, \quad (4)$$

де: a_0, a_s - коефіцієнти полінома, який апроксимує похідні; m - порядок методу, який визначається кількістю попередніх значень функції з інтервалом між ними $h = dt$.

При відсутності навантаження рівняння (1)-(3), з урахуванням (4), для трифазної схеми (рис.1) з n гілками мають вигляд:

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1^{k+1} \\ i_2^{k+1} \\ \dots \\ i_n^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1(t) - V_1 - \Delta V_1 \\ e_2(t) - V_2 - \Delta V_2 \\ \dots \\ e_n(t) - V_n - \Delta V_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_n \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\text{де: } Z_{mn} = R_n + \frac{a_0}{h} L_n + \frac{1}{\frac{a_0}{h} + (C_n R_{cn})^{-1}} \cdot \frac{1}{C_n}, \quad Z_{nk} = Z_{kn} = \frac{a_0}{h} M_{n,k} -$$

- власні і взаємні резистивні опори гілок схеми відповідно;

$$V_n = L_n \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} i_n^{k+1-s} - \left(\frac{a_0}{h} + \frac{1}{C_n R c_n} \right)^{-1} \cdot \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} u c_n^{k+1-s}$$

- протидіючі ЕРС в гілках схеми, які обумовлені накопичуванням енергії у їх власних L , C параметрах;

$$\Delta V_i = \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^n L m_{i,r} \cdot \dot{i}_r^{k+1-s} \cdot \frac{a_s}{h}$$

- додаткові протидіючі ЕРС в гілках схеми, які обумовлені взаємоіндуктивними зв'язками між фазами $L m_{n,k}$.

Використовуючи рівняння (5) та матрицю з'єднань гілок з вузлами схеми P , отримаємо рівняння для знаходження вузлових напруг \vec{U}_y і напруг гілок \vec{U}_g :

$$\left[\vec{U}_y \right] = \left(P \cdot Z^{-1} \cdot P^T \right)^{-1} \cdot P \cdot Z^{-1} \cdot \left[\vec{e}_n(t) - \vec{V}_n - \Delta \vec{V}_n \right]; \quad (6)$$

$$\vec{U}_g = P^{tr} \cdot \vec{U}_y. \quad (7)$$

В подальшому струми гілок знаходимо із (5), а напруги на ємностях – за допомогою (2)-(4).

Для врахування асинхронних двигунів (АД) використовуємо диференційні рівняння останніх, записаних відносно вектора невідомих \vec{X} , до якого входять струми фаз A, B, C статора і еквівалентних фаз a, b, c ротора, швидкість обертання ω і кут повороту γ ротора

$$p \vec{I} = L(\gamma)^{-1} \cdot (\vec{U} - R \vec{I}); \quad p \omega = \frac{1}{J} \cdot (M_{Ad} - M_C); \quad p \gamma = \omega; \quad \vec{X} = \left[\vec{I}, \omega, \gamma \right]^T. \quad (8)$$

В (8) вирази для напруг, струмів, активних опорів фаз статора і ротора АД, а також для символу диференціювання мають вигляд:

$$\vec{U} = [u_A, u_B, u_C, u_a, u_b, u_c]^T; \quad \vec{I} = [i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c]^T; \\ R = \text{diag}[R_A, R_B, R_C, R_a, R_b, R_c]; \quad p = d/dt,$$

для матриці індуктивностей АД, яка складається із підматриць власних індуктивностей статора L_{ss} і ротора L_{rr} та залежних від кута повороту ротора взаємних статор-ротор $L_{sr}(\gamma)$ та ротор-статор $L_{rs}(\gamma)$ -

$$L(\gamma) = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr}(\gamma) \\ L_{rs}(\gamma) & L_{rr} \end{bmatrix},$$

а електромагнітний обертальний момент, момент опору та момент інерції двигуна з механізмом обозначені відповідно як M_{AD}, M_C, J .

За допомогою формул диференціювання назад (4), отримуємо з (8) систему алгебраїчних (9)–(11) рівнянь, після рішення якої методом Ньютона знаходимо на $(k+1)$ -ому кроці розрахунку вектор змінних \vec{X} :

$$\vec{f1} = \vec{U} - \left[R + \frac{a_0}{h} L(\gamma) + \omega \frac{dL(\gamma)}{d\gamma} \right] \cdot \vec{I}^{k+1} - L(\gamma) \cdot \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} \vec{I}^{k+1-s} = 0; \quad (9)$$

$$f2 = \frac{M_{AD} [\vec{I}] - M_C}{J_{AD}} - \frac{a_0}{h} \omega^{k+1} - \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} \omega^{k+1-s} = 0; \quad (10)$$

$$f3 = \omega^{k+1} - \left(\frac{a_0}{h} \gamma^{k+1} + \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} \gamma^{k+1-s} \right) = 0. \quad (11)$$

Математича модель трифазного двообмоткового трансформатора з тристрижневим магнітопроводом, в якій врахована можливість його насичення, згідно другого закону Кірхгофа для первинних і вторинних фазних обмоток з числом витків відповідно w_A, w_B, w_C і w_a, w_b, w_c та рівнянь рівноваги магніторушійних сил і магнітних падінь напруги має вигляд:

$$\left. \begin{cases} L\sigma_A p i_A + w_A p \phi_A = u_A - R_A i_A; \\ L\sigma_B p i_B + w_B p \phi_B = u_B - R_B i_B; \\ L\sigma_C p i_C + w_C p \phi_C = u_C - R_C i_C; \\ L\sigma_a p i_a + w_a p \phi_A = u_a - R_a i_a; \\ L\sigma_b p i_b + w_b p \phi_B = u_b - R_b i_b; \\ L\sigma_c p i_c + w_c p \phi_C = u_c - R_c i_c. \end{cases} \right\}, \quad (12)$$

$$\left. \begin{cases} w_1 p i_A + w_2 p i_a + Lm^{-1}(\phi_A) \cdot p \phi_A + L_0^{-1} p F_0 = 0; \\ w_1 p i_B + w_2 p i_b + Lm^{-1}(\phi_B) \cdot p \phi_B + L_0^{-1} p F_0 = 0; \\ w_1 p i_C + w_2 p i_c + Lm^{-1}(\phi_C) \cdot p \phi_C + L_0^{-1} p F_0 = 0. \end{cases} \right\}. \quad (13)$$

В (12) і (13) фазні напруги, струми, індуктивності розсіювання і активні опори обмоток, динамічна індуктивність магнітопровода, робочі магнітні потоки, та падіння магнітної напруги в фазах і в повітряному зазорі відповідно обозначені як:

$$u_j, i_j, L\sigma_j, R_j (j = A, B, C, a, b, c); \quad Lm(\phi_i) = \partial \phi_i / \partial F_i (j = A, B, C);$$

$$\phi_A, \phi_B, \phi_C, F_A, F_B, F_C, F_0.$$

На основі формул диференціювання назад (4), отримуємо з (12),(13) після відповідних перетворень систему алгебраїчних рівнянь трансформатора у векторно-матричному вигляді :

$$\begin{bmatrix} \vec{I}^{(k+1)} \\ \vec{\phi}^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \frac{a_0}{h} L\sigma & \frac{a_0}{h} W^{tr} \\ \frac{a_0}{h} W & \frac{a_0}{h} R_{maz} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \vec{E} \\ \vec{Vt} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

де: a_0, a_1, \dots, a_m - коефіцієнти полінома згідно (4);

$$\vec{E} = \begin{bmatrix} e_j^{(k+1)} (t+h) - u_j^{(k+1)} - \sum_{s=1}^m (a_s / h) \cdot (L_j \vec{i}_j^{k+1-s} + w_j \vec{\phi}^{k+1-s}) \end{bmatrix}; \quad j = (A, B, C, a, b, c);$$

$$\vec{\phi}^{k+1-s} = \begin{bmatrix} \phi_A^{k+1-s}, \phi_B^{k+1-s}, \phi_C^{k+1-s}, \phi_A^{k+1-s}, \phi_B^{k+1-s}, \phi_C^{k+1-s} \end{bmatrix}^{tr};$$

$$\vec{Vt} = \begin{bmatrix} \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} \left(-w_A \vec{i}_A^{k+1-s} - w_a \vec{i}_a^{k+1-s} + \frac{\phi_A^{k+1-s}}{Lm(\phi_A)} + \frac{1}{L_0} (F_0^{k+1-s}) \right); \\ \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} \left(-w_B \vec{i}_B^{k+1-s} - w_b \vec{i}_a^{k+1-s} + \frac{\phi_B^{k+1-s}}{Lm(\phi_B)} + \frac{1}{L_0} (F_0^{k+1-s}) \right); \\ \sum_{s=1}^m \frac{a_s}{h} \left(-w_C \vec{i}_C^{k+1-s} - w_c \vec{i}_a^{k+1-s} + \frac{\phi_C^{k+1-s}}{Lm(\phi_C)} + \frac{1}{L_0} (F_0^{k+1-s}) \right). \end{bmatrix}$$

Для моделювання обмежувачів перенапруг ОПН використані їх нелінійні вольт-амперні характеристики, які надаються заводами-виробниками. При цьому вольт-амперна характеристика апроксимується аналітичною функцією, за допомогою якої представляється залежність опору гілки ОПН від напруги або струму.

При цьому залежність нелінійного опору ОПН від струму має вигляд :

$$R(i_{ОПН}) = \kappa \cdot (i_{ОПН})^{m-1} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot U_H}{\sqrt{3}},$$

де: $\kappa = 2.6$; $m = 0,086$ (для обмежувачів типу ОПН-КР/ТЕЛ-6/6.0 УХЛ2 заводу Таврида Електрик з номінальною напругою $U_H = 6$ кВ); $i_{ОПН}, A$ - миттєве значення струму через ОПН.

Результатами моделювання перехідних процесів підтверджено обмеження перенапруг за допомогою ОПН, якщо їх поріг спрацювання по напрузі знаходиться в межах 6300-6500 В, а тривалість дугового замикання для ОПН можна знайти використовуючи його допустиму теплоємність.

За допомогою математичної моделі виявлені також перенапруги в асинхронних двигунах, які досягають (3-4) U_H при комутаціях вимикачів,

особливо в режимах відключення при неуспішному запуску. Математична модель використовувалась для досліджень перехідних процесів в мережах 6-10 кВ, а також в системі власних потреб електростанції з урахуванням взаємних індуктивностей і міжфазних ємностей мереж живлення, асинхронних двигунів, вимірювальних та приєднувальних трансформаторів з урахуванням насичення їх магнітопроводів, а також нейтралі мережі, заземленої через резистор або через дугогасний реактор. Дугові замикання моделюються напругою пробою ізоляційного проміжка та активним опором в місці замикання, а згасання дуги - при переході через нуль струму високо частотної складової або промислової частоти.

У третьому розділі «Метод обмеження перенапруг за допомогою низьковольтного резистивного заземлення нейтралі» розглянуто спосіб заземлення нейтралі мережі 6 кВ через низьковольтний резистор, який підключається до обмоток нижчої напруги однофазних приєднувальних трансформаторів, що з'єднані в розімкнений трикутник.

Одним із відомих напрямків підвищення надійності роботи мереж 6-10 кВ є резистивне заземлення нейтралі мережі, що дозволяє підвищити рівень струмів замикання на землю, а внаслідок цього і чутливість релейного захисту від ОЗЗ, запобігти виникненню ферорезонансних процесів і знизити кратність перенапруг. При цьому пропонується заземлення нейтралі додаткового приєднувального трансформатора (рис.2а) через високовольтний резистор R_B . Величина опору високовольтного резистора вибирається з умови створення активної складової струму при ОЗЗ приблизно рівній ємнісному струму. В якості високовольтного резистора R_B пропонується використовувати бетелові резистори, або сучасні резистори на основі кераміки. Але таким резисторам притаманні суттєві недоліки: великі габарити, велика вартість, недостатня термостійкість. Це обмежує їх впровадження на діючих електропідприємствах. Перевагою схем, що пропонуються в роботі (рис.2б,в) є суттєве зменшення габаритів і вартості пристрою у зв'язку з низькою вартістю ізоляції низьковольтних резисторів R_H .

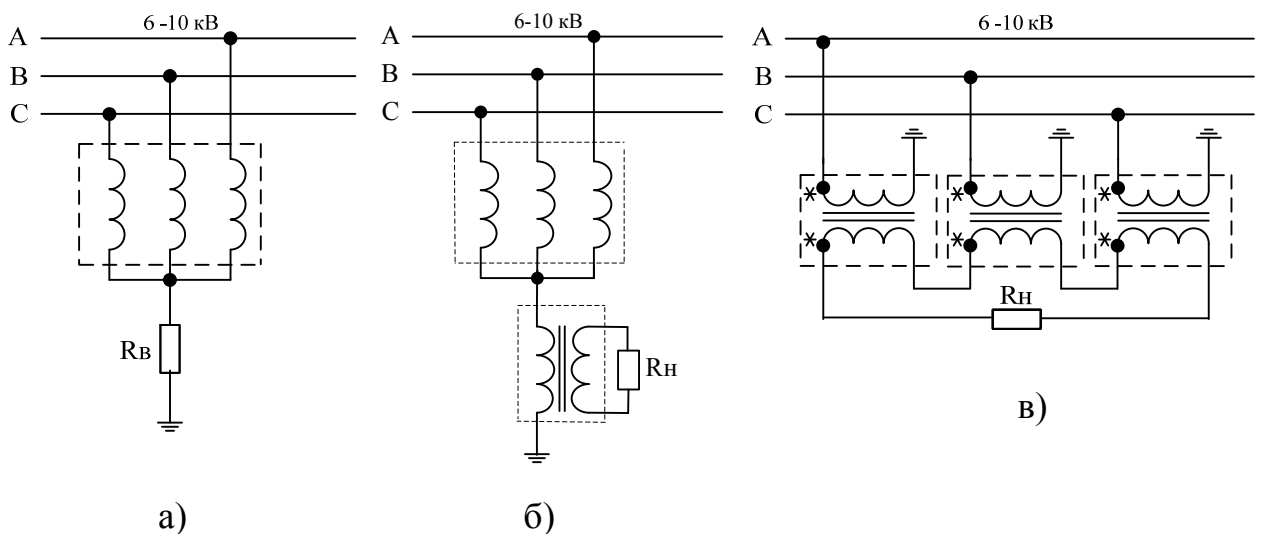


Рисунок 2. Схеми підключення високовольтного (а) і низьковольтного (б, в) резисторів

Використання трифазного двообмоткового трансформатора для підключення резистора до обмоток нижчої напруги потребує магнітопроводів панцерного типу. У зв'язку з цим більш доцільне використання двообмоткового серійного тристрижневого трансформатора з підключенням до його нейтралі низьковольтного резистора через додатковий однофазний трансформатор 3,5/0,4 кВ (рис.2б). Можливо також використати три однофазних трансформатори з коефіцієнтом трансформації 6/0,4 кВ (рис.2в). В цьому випадку резистор підключається до його обмоток нижчої напруги, з'єднаних в розімкнений трикутник. При заданому ефекті обмеження перенапруг для всіх схем, потужність резисторів повинна бути однаковою. Виходячи з цієї умови, визначимо параметри трансформаторів і резисторів, наприклад, для схеми рис.2в. Для обмеження рівня перенапруг при ОЗЗ до $2,5U_H$, величину високовольтного резистора R_B , виберемо за умови розряду ємності мережі за половину періоду промислової частоти (0,01с). Оскільки постійна часу розряду ємності становить $\tau = (3-4)RC$, то при ємнісному струмі мережі I_C опори високовольтного R_B та низьковольтного R_H резисторів знаходимо, використовуючи наведені нижче залежності:

$$R_B \leq \frac{0,01}{(3 \div 4) \cdot C} ; \quad I_C = U_\phi \cdot \omega \cdot C ; \quad I_{RB} = \frac{U_\phi}{R_B} ; \quad I_{RH} = \frac{3 \cdot U_\phi}{K_T \cdot R_H} ;$$

$$R_B I_{RB}^2 = R_H I_{RH}^2 ; \quad R_H = \frac{9 \cdot R_B}{K_T^2} ; \quad P_{RH} = \frac{9U_\phi^2}{K_T^2 \cdot R_H} ,$$

де: C – сумарна ємність трьох фаз мережі; U_ϕ – фазна напруга; $\omega = 2\pi f$ – кутова частота; K_T - коефіцієнт трансформації однофазного трансформатора.

Результатами моделювання (рис.3) підтверджена ефективність запропонованої схеми заземлення нейтралі через низьковольтний резистор при підключенні його в розімкнений трикутник обмоток нижчої напруги однофазних приєднувальних трансформаторів. Кратність перенапруг при ОЗЗ знижена з $3,9 U_H$ (при ізольованій нейтралі) до $2,3 U_H$ при наявності низьковольтного резистора.

На основі аналізу схем електропостачання власних потреб найбільш розповсюджених в Україні блоків потужністю 200 і 300 МВт, де ємнісні струми секцій не перевищують 5А, рекомендується схема (рис.2в). Однофазні трансформатори вибирають напругою 6/0,4 кВ і потужністю кожної фази 10 кВА. Опір низьковольтного резистору становить 15 - 30 Ом з номінальним струмом 20-25 А. Такі резистори і трансформатори серійно випускаються промисловістю.

У четвертому розділі «Розробка і дослідження способу підвищення чутливості струмових захистів від замикань на землю в системах електропостачання 6-10 кВ» розглянуто питання вдосконалення існуючого релейного захисту від ОЗЗ та розроблено метод підвищення чутливості і селективності його дії в кабельних мережах 6-10 кВ за рахунок введення в трансформатори струму нульової послідовності допоміжного магнітного потоку, який пропорційний напрузі нульової послідовності, і завдяки якому, в залежності від місця замикання, підсилюється або послаблюється основний потік від власного ємнісного струму приєднання.

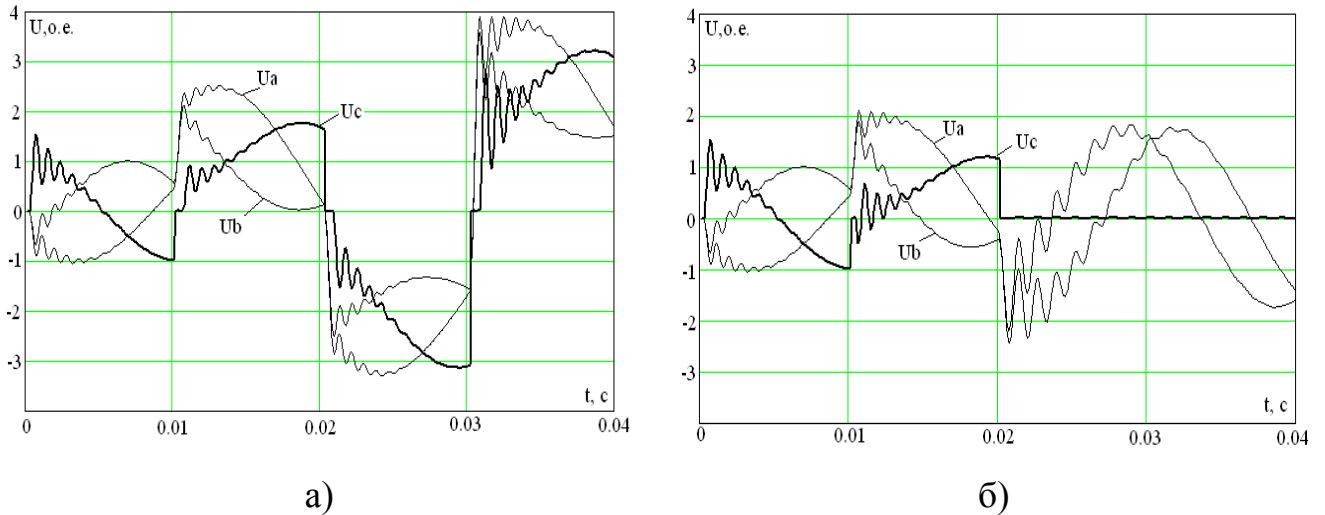


Рисунок 3. Характер зміни перенапруг при дуговому ОЗЗ в мережі 6 кВ при відсутності (а) і наявності (б) низьковольтного резистора

Для промислових підприємств, де захист від ОЗЗ повинен діяти на відключення ушкоджених приєднань за умов технологічного процесу або вимог техніки безпеки, забезпечення швидкодіючого і селективного захисту від ОЗЗ є одним з напрямків підвищення надійності роботи цих мереж. Однією з причин неселективної роботи релейного захисту при ОЗЗ є дугові замикання і ферорезонансні процеси при комутаціях електрообладнання. При використанні направленої струмового захисту через виникнення резонансних процесів з частотою напруги $3U_0$ нижче 50 Гц, тоді як струм $3I_0$ має частоту близьку до номінальної, виникає втрата направленості дії чутливого захисту. Більш стійкі до резонансних процесів ненаправлені струмові реле, але останні дуже важко узгоджувати за уставками спрацювання, якщо власні ємнісні струми замикання на землю окремих приєднань значно відрізняються між собою. В результаті цього при ОЗЗ часто відключається ушкоджене приєднання і два – три неушкоджених. Таким чином існуючі пристрої релейного захисту не відповідають вимогам надійності цих мереж.

У роботі розглянуто питання вдосконалення існуючого захисту від ОЗЗ на прикладі реле РТЗ-51, яке використовується в мережах власних потреб електростанцій з малими струмами замикання на землю. Ємнісні струми окремих приєднань значно відрізняються між собою, через що виникають складнощі з узгодженням уставок захисту, які повинні в 3-5 разів перевищувати власний ємнісний струм приєднання. Основна ідея вдосконаленого захисту полягає в підвищенні чутливості захисту за рахунок створення в трансформаторах струму нульової послідовності (ТНП) допоміжного магнітного потоку, пропорційного напрузі $3U_0$, який при ОЗЗ на ушкоджене приєднання підсилює основний магнітний потік, а на неушкоджене – послаблює. Допоміжна обмотка ТНП для забезпечення необхідних фазових зсувів (0° або 180°) підключається через ємність до обмотки розімкнутого трикутника вимірювального трансформатора напруги ТН (рис.4). При цьому коефіцієнт відстройки від кидків струму при ОЗЗ для такого

перенапруг, скорочення дії дугових замикань на землю шунтуванням ушкодженої фази і підвищення чутливості та селективності релейного захисту від ОЗЗ.

Система включає кероване низьковольтне резистивне заземлення нейтралі та пристрій вибору ушкодженої фази з автоматичним її шунтуванням. Принципова схема комплексної системи приведена на (рис.5).

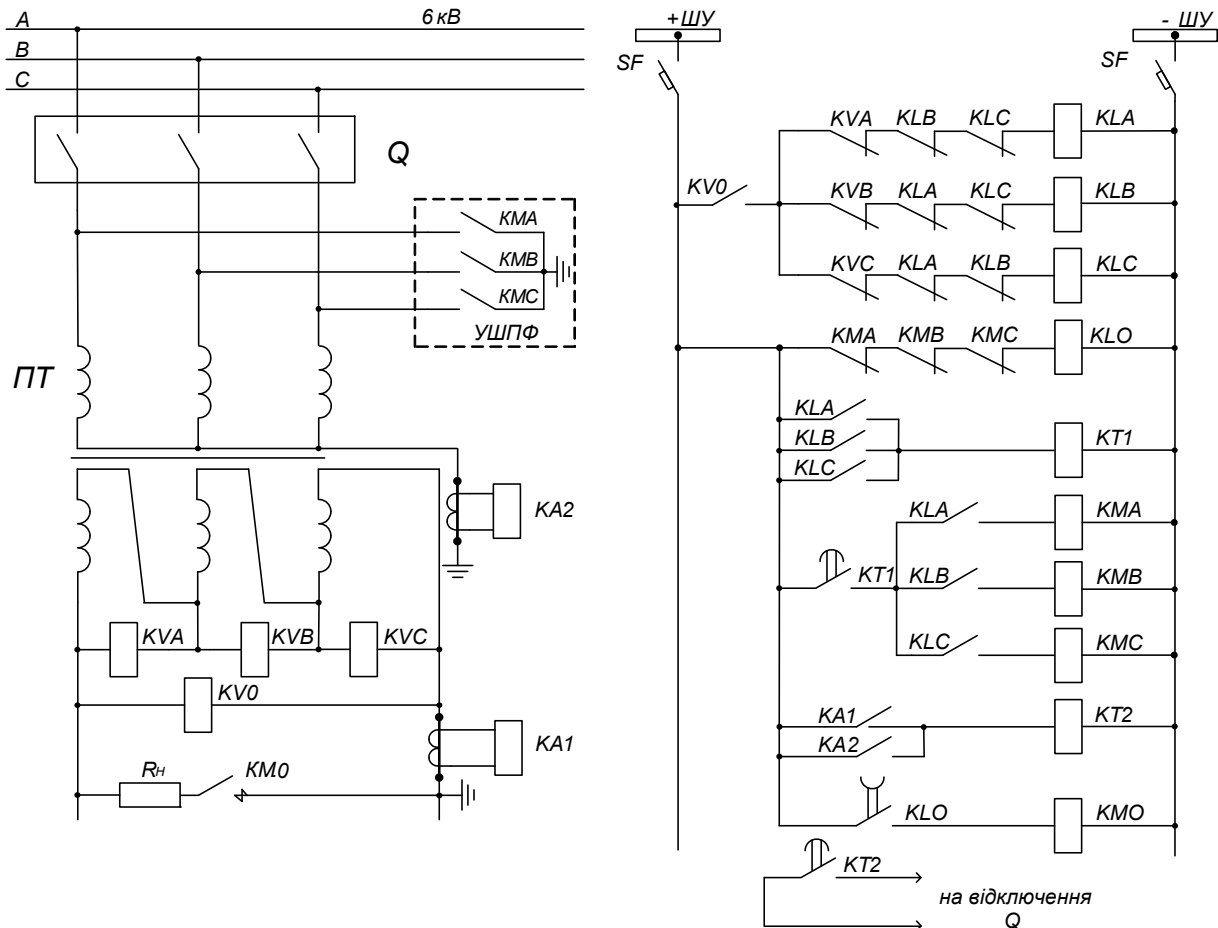


Рисунок 5. Принципова схема керування резистивним заземленням і шунтуванням ушкодженої фази при ОЗЗ

На схемі (рис.5): KVA, KVB, KVC – реле контролю фазних напруг; $KV0$ – реле контролю напруги нульової послідовності; $KT1, KT2$ – реле часу; KLA, KLB, KLC – проміжні реле; $KA1, KA2$ – струмові реле; $KM0$ – контактор для відключення резистора R_H ; KMA, KMB, KMC – контактори шунтування ушкодженої фази при ОЗЗ; KLO – проміжне реле з затримкою на відпадання.

Схема містить три однофазних трансформатори $ПТ$, які підключені до мережі 6-10 кВ, первинні обмотки яких з'єднані у зірку з заземленим нульовим виводом. Обмотки нижчої напруги з'єднані в розімкнутий трикутник, до якого через силові контакти контактора $KM0$ підключено низьковольтний резистор R_H , термічна стійкість якого розрахована на короточасне (до 5-10 с) протікання струму, що забезпечує необхідну чутливість захисту від ОЗЗ в мінімальних режимах роботи мережі. До виводів обмоток вищої напруги $ПТ$ підключені три однофазних

контактори *КМА*, *КМВ*, *КМС* (або трифазний з пофазним керуванням), вторинні виводи яких з'єднані з землею. Керування цими контакторами здійснюється за допомогою схеми вибору ушкодженої фази, яка при *ОЗЗ* з затримкою в часі (реле *КТ1*), достатньою для спрацювання захистів приєднань, що відходять від шин, подає команду на включення контактора відповідної фази *КМА*, *КМВ* або *КМС*, завдяки чому дугове замикання на землю переводиться в глухе. Якщо захист приєднань діє на сигнал, то в такому стані контактор буде знаходитися до виявлення ушкодженого приєднання та його відключення експлуатуючим персоналом.

На протязі часу від моменту появи замикання на землю до включення шунтуючого контактора струм у місці замикання буде складатися з ємнісного струму мережі і активного струму приєднувального трансформатора *ПТ*. У цей проміжок часу до включення одного з контакторів *КМА*, *КМВ* або *КМС* захист від *ОЗЗ* приєднань, що відходять від шин, буде надійно спрацьовувати і відключати ушкоджене приєднання.

Схема дозволяє тривалу роботу мережі з глухим замиканням на землю, якщо по технологічним умовам ушкоджене приєднання не може бути миттєво відключене. Після включення шунтуючого контактора подається команда на розмикання силових контактів контактора *КМ0* в ланцюгу резистора і активний струм підживлення місця замикання від *ПТ* буде дорівнювати струму холостого ходу останнього, а у місці замикання буде протікати тільки ємнісний струм.

Параметри приєднувального трансформатора *ПТ* і активний опір резистора R_H в ланцюгу обмотки низької напруги вибирають з двох вимог: а) забезпечення необхідного коефіцієнта чутливості струмових реле приєднань; б) створення додаткового активного струму трансформатора *ПТ*, що перевищує максимальне значення власного ємнісного струму для забезпечення значення перенапруг не більше $2,1 U_\phi$ і супротиву виникнення ферорезонсних процесів.

Функціонування системи резистивного заземлення (*СРЗ*) нейтралі мережі при однофазних замиканнях на землю і автоматичного шунтування місця ушкодження (*АШП*) представлено на рис.6 за даними розрахунку за допомогою розробленої математичної моделі.

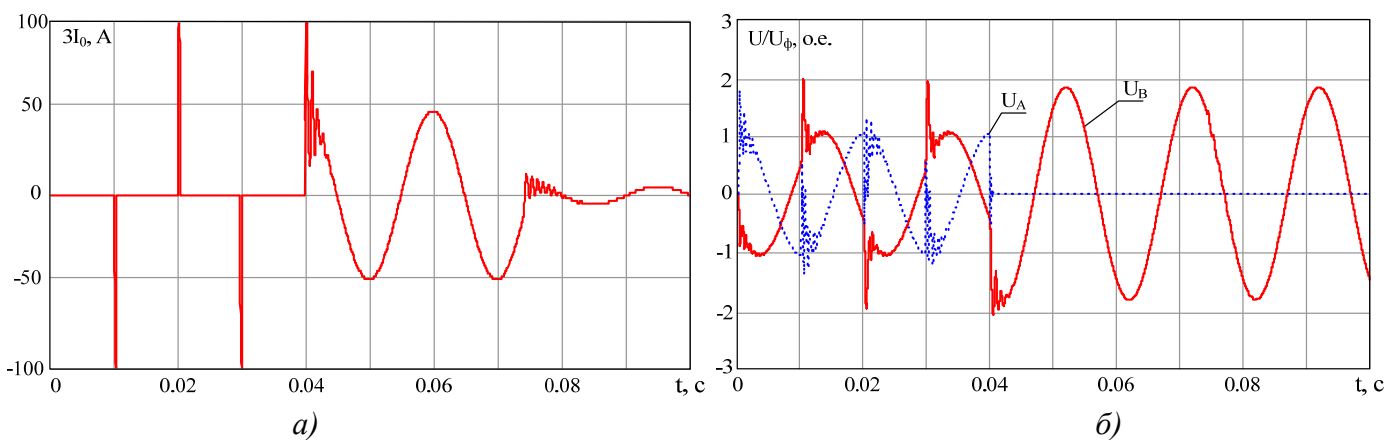


Рисунок 6. Характер заміни струму (а) і напруг (б) в мережі 6 кВ при *ОЗЗ* і регульованому резистивному заземленні нейтралі та шунтуванні ушкодженої фази

З рис.6 видно, що при виникненні замикання фази на землю через дугу рівень перенапруг не перевищує $2,1 U_{\phi}$, а струм у місці замикання, при переході дугового замикання в глухе, складає 34 А, що достатньо для надійного спрацювання захисту від ОЗЗ. Після закінчення заданої витримки часу ($t = 0,074$ с) відключається резистор R_H і струм ОЗЗ знижується до рівня ємнісного струму мережі (3,5 А). При моделюванні мережі, в якій відсутні пристрої СРЗ і АШП (рис.3а), нестійкі дугові замикання до моменту переходу дугового замикання в глухе, супроводжуються перенапругами, які досягають $3,9 U_{\phi}$, що може привести до виникнення міжфазних замикань, а після переходу дугового замикання в глухе струм ОЗЗ може бути недостатнім для спрацювання захисту.

Таким чином, запропонована система резистивного заземлення нейтралі мережі СРЗ і автоматичного шунтування ушкодженої фази АШП має наступні переваги: а) рівень перенапруг обмежується до $2,1 U_{\phi}$; б) використовуються малогабаритні, які мають низьку вартість, низьковольтні резистори з термічною стійкістю декілька секунд замість резисторів, розрахованих на тривале протікання струму 2–4 години; в) забезпечується надійне спрацювання захисту при ОЗЗ на усіх приєднаннях і для усіх режимів роботи системи електропостачання (пуски, зупинки, нормальний режим роботи блоку), так як уставка спрацювання по струму вибирається по активному струму ПТ; г) практично повністю виключаються тривалі дугові замикання в мережі та їх негативні наслідки, так як вони можуть виникати тільки в початковий час ОЗЗ до включення шунтуючого контактору; д) потужність ПТ може бути вибрана значно нижчою ніж при високовольтному резисторі, так як він вибирається по струму ОЗЗ, який протікає тільки в обмежений час до відключення резистора.

У розділі приводяться результати експериментальних досліджень режимів ОЗЗ на фізичній моделі 6 кВ та на діючій підстанції і результати впровадження розроблених пристроїв обмеження перенапруг та підвищення чутливості струмового захисту від ОЗЗ на п/ст 35/6 кВ «Руднична» Докучаївського ФДК та в мережі власних потреб 6 кВ блоку 300 МВт Зуївської ТЕС.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене актуальне науково-прикладне завдання підвищення надійності роботи мереж 6-10 кВ при однофазних замиканнях на землю за рахунок комплексної системи обмеження перенапруг та удосконалення релейного захисту. На основі проведених в роботі досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Розроблено більш досконалу математичну модель мережі 6-10 кВ для аналізу перехідних процесів при ОЗЗ, в якій враховуються двигунне навантаження, нелінійні характеристики ОПН, приєднувальні трансформатори та трансформатори напруги, міжфазні взаємні індуктивності та ємності приєднань. Розроблена модель дозволяє досліджувати комутації вакуумними вимикачами і перенапруги в цих режимах на асинхронних двигунах, характер протікання перехідних процесів при ОЗЗ і засоби підвищення надійності роботи мереж.

2. Згідно директивних матеріалів допустиме значення струму глухого ОЗЗ в мережах з двигунним навантаженням становить 10 А. Проте математичним моделюванням встановлено, що при дуговому однофазному замиканні на землю, за рахунок виникнення високочастотної складової струму, середньоквадратичне значення струму при ОЗЗ може бути значно більшим.

3. Для підвищення надійності роботи мереж з ізольованою нейтраллю результатами математичного моделювання показана доцільність використання регульованого низьковольтного резистивного заземлення нейтралі і шунтування uszkodженої фази, що комплексно вирішує проблему обмеження перенапруг і підвищення чутливості релейного захисту від ОЗЗ.

4. Для запропонованих схем з заземленням нейтралі через низьковольтні резистори розроблено методику вибору параметрів приєднувальних трансформаторів і резисторів, що дозволяє уникнути використання значно дорожчих і громіздких високовольтних резисторів, які рекомендовані відомчими циркулярами.

5. Запропоновано спосіб підвищення чутливості захисту від ОЗЗ шляхом використання додаткової обмотки трансформатора струму нульової послідовності, яка підключена через ємність до обмоток трансформатора напруги, що з'єднані у розімкнутий трикутник.

6. Розроблено комплексну систему, в якій використано автоматичне шунтування uszkodженої фази (АШП) і кероване низьковольтне резистивне заземлення нейтралі, що вирішує проблему обмеження перенапруг і підвищення чутливості релейного захисту.

7. Результати математичного моделювання та досвід експлуатації елементів системи релейного захисту і автоматичного шунтування uszkodженої фази підтверджують позитивні якості запропонованого пристрою обмеження перенапруг і підвищення чутливості дії релейного захисту від ОЗЗ в мережах 6-10 кВ.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Сивокобыленко В.Ф. Повышение надежности работы карьерных сетей при однофазных замыканиях на землю / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев, А.В. Ковязин, Р.П. Сердюков, С.А. Кряжок, А.И. Гребенкин, В.В. Зубенко, И.Э. Рябчук // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика», випуск 9 (158). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2009. – С. 211–221.

2. Сивокобыленко В.Ф. Математическое моделирование асинхронных двигателей при повреждениях стержней короткозамкнутого ротора / В.Ф. Сивокобыленко, В.А. Павлюков, Р.П. Сердюков, В.И. Бондаренко, С.П. Яременко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика», випуск 9 (158). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2009. – С. 222–226.

3. Сердюков Р.П. Резисторное заземление нейтрали сети 6 кВ в системе собственных нужд электростанций / Р.П. Сердюков // Вісник Кременчуцького

державного університету імені М. Остроградського. – Кременчук: КДУ, 2010. – Вип. 4(63) частина 2. – С. 117 – 120.

4. Сивокобыленко В.Ф. Ограничение перенапряжений и повышение чувствительности защит от замыканий на землю в сети собственных нужд 6 кВ электростанций / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев, Р.П. Сердюков // Научно-прикладный журнал «Технічна електродинаміка». Тематичний випуск «Проблеми сучасної енергетики». Інститут електродинаміки, Національна академія наук України. – Частина 1. – Київ, 2010. – С. 59 – 62.

5. Сивокобыленко В.Ф. Переходные процессы в электрических сетях с резисторным заземлением нейтрали / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев, Р.П. Сердюков // Материалы международной научно-практической конференции «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве 2010». Том 6. Технические науки. Проект SWorld. – Одесса: Черноморье, 2010. – С. 27 – 35.

6. Сивокобыленко В.Ф. Совершенствование схемы электроснабжения и защиты двухскоростных асинхронных приводов / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев, А.В. Ковязин, Р.П. Сердюков // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010, № 28. – С. 301 – 302.

7. Сивокобыленко В.Ф. Залежність перенапруг на виводах асинхронного двигуна від віддаленості джерела живлення / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев, А.В. Ковязин, Р.П. Сердюков // Енергетика та системи керування: Матеріали II Міжнародної конференції молодих вчених EPECS-2010. – Львів: Видавництво "Львівської політехніки". 2010. – С. 42 – 43.

8. Сивокобыленко В.Ф. Развитие математической модели для анализа переходных процессов в системе собственных нужд электростанций при замыкании фазы на землю / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев, Р.П. Сердюков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика», випуск 10 (180). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. – С. 153–161.

9. Сивокобыленко В.Ф. Повышение надежности работы сетей 6-10 в режимах замыкания фазы на землю / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев, Р.П. Сердюков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика», випуск 11 (186). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. – С.349 – 353.

В публікаціях, що написані у співавторстві, здобувачу належить: [1] – принципова схема вдосконаленого захисту від замикань фази на землю, [2] – аналітичні вирази для формування елементів зворотної матриці індуктивностей АД, [4,5] –методика вибору параметрів трансформатора та низьковольтних резисторів, [6,7] – проведення розрахунків і аналіз отриманих результатів, [8] – математичний запис диференційних рівнянь АД та трансформаторів, реалізація моделі на ПЕОМ, у [9] – розробка принципової схеми пристрою та експериментальні дослідження.

АНОТАЦІЇ

Сердюков Р. П. Удосконалення методів захисту та обмеження перенапруг в мережах 6-10 кВ при замиканнях фази на землю. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Донецький національний технічний університет, Донецьк, 2013.

В дисертаційній роботі дістала подальший розвиток математична модель для дослідження перехідних процесів в мережах 6-10 кВ при ОЗЗ на основі диференційних рівнянь її елементів, яка відрізняється врахуванням рівнянь магнітно-зв'язаних статорних і роторних контурів асинхронних двигунів, обмоток приєднувальних трансформаторів з заземлюючим резистором, нелінійних обмежувачів перенапруг та комутаторів для шунтування ушкодженої фази з їх системою керування. Удосконалено метод підвищення чутливості захисту приєднань при замиканнях фази на землю шляхом підсилення магнітно-рушійної сили в трансформаторах струму нульової послідовності ушкоджених приєднань та її послаблення в трансформаторах неушкоджених приєднань завдяки подачі через ємність напруги нульової послідовності на допоміжні обмотки трансформаторів струму. Метод дозволяє підвищити коефіцієнт чутливості захисту до нормативних значень в мережах 6-10 кВ з малими струмами замикання на землю, у тому числі і в режимах з мінімальною кількістю приєднань в радіальній мережі. Розроблено комбінований метод обмеження перенапруг, в якому виключення ескалації напруги досягнуто за допомогою керованого низьковольтного резистивного заземлення нейтралі, а скорочення дії дугових замикань забезпечується шунтуванням ушкодженої фази при ОЗЗ. Результати математичного моделювання та досвід експлуатації елементів системи підтверджують позитивні якості запропонованого пристрою обмеження перенапруг і захисту від ОЗЗ.

Ключові слова: математична модель, дугове замикання, обмеження перенапруг, підвищення надійності, низьковольтний резистор, захист від ОЗЗ.

Сердюков Р. П. Совершенствование методов защиты и ограничения перенапряжений в сетях 6-10 кВ при замыканиях фазы на землю. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – Электрические станции, сети и системы. – Донецкий национальный технический университет, Донецк, 2013.

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача повышения надежности работы сетей 6-10 кВ при однофазных замыканиях фазы на землю за счет усовершенствования резистивного заземления нейтрали сети и разработке методов математического моделирования этих сетей при ОЗЗ, ограничения длительности перенапряжений и повышения чувствительности и селективности действия релейной защиты от ОЗЗ.

Разработана более совершенная математическая модель для исследования переходных процессов в сетях 6-10 кВ при ОЗЗ на основе дифференциальных уравнений ее элементов, которая отличается учетом уравнений магнитно связанных

статорных и роторных контуров асинхронных двигателей, обмоток присоединительных трансформаторов с заземляющим резистором, нелинейных ограничителей перенапряжений и коммутаторов для шунтирования поврежденной фазы с их системой управления. С помощью разработанной модели представляется возможным исследовать коммутации вакуумными выключателями и перенапряжения в этих режимах на асинхронных двигателях, характер протекания феррорезонансных процессов при ОЗЗ и средства их предупреждения, а также оценивать поведение разного типа устройств защиты от замыканий фазы на землю. Результаты математического моделирования глухих и дуговых замыканий фазы на землю в системе собственных нужд 6 кВ ТЭС показали, что допустимое значение тока ОЗЗ в системе электроснабжения с высоковольтными двигателями должны находиться с учетом среднеквадратичного значения высокочастотной составляющей суммарного тока замыкания на землю, которое не учитывается директивными материалами.

Разработан метод повышения чувствительности защиты от ОЗЗ путем использования дополнительной обмотки трансформатора тока нулевой последовательности, которая подключена через емкость к обмоткам трансформатора напряжения, соединенных в разомкнутый треугольник, разработана методика выбора параметров дополнительной обмотки ТНП и емкости.

Для повышения надежности работы сетей с изолированной нейтралью результатами математического моделирования показана целесообразность использования регулируемого низковольтного заземления нейтрали и шунтирования поврежденной фазы, которые эффективно решают проблему ограничения перенапряжений и повышение чувствительности релейной защиты от ОЗЗ. Разработана методика выбора параметров присоединительных трансформаторов и низковольтных резисторов, которые включаются в цепь разомкнутого треугольника обмоток низкого напряжения этих трансформаторов вместо использования значительно более дорогих и громоздких высоковольтных резисторов.

Разработан комбинированный метод ограничения перенапряжений, в котором исключение эскалации напряжения достигнуто с помощью управляемого низковольтного резисторного заземления нейтрали, а сокращение действия дуговых замыканий обеспечивается шунтированием поврежденной фазы при ОЗЗ. Предложено устройство реализации разработанного способа повышения надежности работы сетей с изолированной нейтралью, схема его защиты и принципиальная схема управления резистивным заземлением нейтрали с шунтированием поврежденной фазы при ОЗЗ.

Результаты математического моделирования и опыт эксплуатации элементов системы релейной защиты и автоматического шунтирования поврежденной фазы подтверждают положительные качества предложенного устройства ограничения перенапряжений и повышения чувствительности действия релейной защиты от ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью. Эффективность разработанной системы подтверждена внедрением ее элементов в промышленности.

Ключевые слова: математическая модель, дуговое замыкание, ограничение перенапряжений, повышение надежности, низковольтный резистор, защита от ОЗЗ.

Serdyukov R. P. Improvement of methods of protection and surge suppression in networks of 6-10 kV during line-to-ground faults. – Asthe manuscript.

The dissertation for academic degree of candidate of technical science on the speciality 05.14.02 – electric power stations, networks and systems. – Donetsk national technical university, Donetsk, 2013.

In the thesis the mathematical model for investigation of transients in networks of 6-10 kV during line-to-ground faults on the basis of differential equations of its elements received further development. The model is different in taking into account equations of magnetically connected stator and rotor circuits of induction motors, connecting transformers with a protective resistor, nonlinear surge suppressors and switches to bypass damaged phase with their control system.

The method of increasing the sensitivity of the protection of the connections during line-to-ground faults by means of strengthening the magnetic force of the transformers of a current of zero sequence of faulty connections and its weakening in transformers intact connections by connecting through capacitance to zero sequence voltage of auxiliary windings of transformers was improved. The method allows to increase sensitivity coefficient of protection to the standard values in networks of 6-10 kV with low ground fault currents, including the modes with the minimum number of connections in the radial network.

The combined method of surge suppression is developed. The method excluded the escalation of voltage with the help of controlled low voltage resistance neutral grounding, and reduction of time of validity of the arc protection is provided by bypassing damaged phase during line-to-ground faults. Results of mathematical modeling and operating experience of embedded elements of the system can confirm a positive quality of the proposed device, surge suppression and protection from line-to-ground faults.

Keywords: mathematical model, arc faults, surge suppression, increased reliability, low-voltage resistor, protection from line-to-ground faults.