



НІЩЕНКО В.В., інж. ВП ДП "НЕК "Укренерго" Дніпровська ЕС,
КУЛАГІН Д.О., канд. техн. наук, доцент, проф.,¹
МАХЛІН П.В., канд. техн. наук, доцент,¹
¹Кафедра "Електропостачання промислових підприємств"
 Запорізького національного технічного університету

ВПЛИВ ЄМНІСНОЇ ПРОВІДНОСТІ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ НА ФУНКЦІОНУВАННЯ ДИФЕРЕНЦІЙНО-ФАЗНОГО ЗАХИСТУ ШИН В АВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ

У статті розглянута актуальна науково-прикладна задача, що полягає у дослідженні впливу ємності ліній електропередачі надвисокого класу напруги на визначення дійсних співвідношень між фазами струмів приєднань в аварійних режимах енергосистеми диференційно-фазним захистом шин, що може бути впроваджений у технічну експлуатацію у якості основного захисту збірних шин напругою 110-750 кВ розподільчих установок енергетичних об'єктів. Авторами проведено розрахунок аварійних режимів для реального енергетичного об'єкта, у якості якого була обрана одна з найбільш потужних підстанцій у Дніпровській електроенергетичній системі державного підприємства НЕК "Укренерго" — підстанція 750 кВ "Запорізька". Приведена однолінійна принципова схема даної підстанції, її розрахункова схема та схема заміщення. Розрахунок комплексних величин еквівалентних опорів схеми заміщення проводився для режиму з компенсацією ємнісної провідності повітряних ліній 750 кВ та для режиму без її компенсації. За отриманими результатами зроблено висновок про те, що ємнісна провідність повітряних ліній надвисокої напруги не призводить до порушення селективної дії диференційно-фазного захисту шин в аварійних режимах, що підтверджується виконанням умов спрацювання захисту при внутрішніх коротких замиканнях та умови його неспрацювання при зовнішніх коротких замиканнях, що дозволяє не враховувати вплив ємнісної провідності при розрахунку уставки параметра кута блокування даного типу захисту шин, а також не застосовувати додаткових засобів з компенсації ємнісної складової струму.

К л ю ч о в і с л о в а: релейний захист, диференційно-фазний захист шин, збірні шини, ємнісна провідність, надвисока напруга, лінії електропередачі, аварійний режим.

Вступ. Магістральні електричні мережі (ЕМ) надвисокого класу напруги (напругою 500 кВ та вище, згідно [1]) споруджуються з метою передачі значних за величиною обсягів електричної енергії від потужних електричних станцій (ЕС) на далекі відстані до пунктів її розподілу та споживання або з метою транзиту виробленої електричної енергії між окремими частинами електроенергетичної системи (ЕЕС) у межах однієї держави та міждержавними зв'язками.

Як відомо, лінії електропередачі (ЛЕП) напругою 500 кВ та вище мають значну ємнісну провідність, величина якої залежить від конструктивних параметрів та габаритних розмірів ЛЕП, а також від їх класу напруги і протяжності [2]. Так, наприклад, відповідно до розрахункових даних, наведених у [2], ємнісна провідність повітряних ліній (ПЛ) напругою 750 кВ, виконаних проводом марки АС-400/51 (при застосуванні 5 провідників на одну фазу ПЛ) на кожні 100 км цих ПЛ становить приблизно $b_0 = 4,13 \cdot 10^{-4}$ См, у той час як їх зарядна потужність досягає майже $q_0 = 232$ МВАр у розрахунку на кожні 100 км довжини. Застосовуючи ці дані можна наближено розрахувати величину ємнісного струму, що буде генеруватись у нормальному режимі роботи вказаною ПЛ на кожні 100 км її довжини за наступним виразом [3]:

$$I_C = U_{\text{ПЛ}} b_0, \quad (1)$$

де $U_{\text{ПЛ}}$ — номінальна напруга ПЛ; b_0 — питома ємнісна провідність ПЛ на кожні 100 км її довжини [2].

$$I_C = 750 \cdot 10^3 \cdot 4,13 \cdot 10^{-4} = 310 \text{ А.}$$

Отримане значення ємнісного струму $I_C = 310$ А ПЛ 750 кВ довжиною у 100 км є суттєвим та у разі її незначного завантаження за активною потужністю може виявитись співставним за величиною зі струмом навантаження даної ПЛ. У випадку значної протяжності ПЛ 750 кВ ємнісна складова струму може дорівнювати, або ж навіть перевищувати активно-індуктивну складову струму навантаження у тому разі, якщо на ПЛ не передбачається жодних технічних заходів із компенсації її ємнісної провідності, що детально описані у [1]. Через це ємнісні струми ЛЕП надвисокого класу напруги за певних умов можуть впливати на нормальне (селективне) функціонування пристроїв релейного захисту (РЗ), встановлених на енергетичних об'єктах з вищою напругою 500–750 кВ [3].

У статті, зокрема, досліджено вплив ємнісної провідності ПЛ надвисокого класу напруги на функціонування пристроїв диференційно-фазного захисту шин (ДФЗШ), що можуть бути впроваджені в експлуатацію у якості основного захисту збірних шин (ЗШ) напругою 110–750 кВ розподільчих установок (РУ) енергетичних об'єктів [4], в аварійних режимах ЕЕС.

Особливості побудови, принцип дії та спосіб налаштування пристроїв ДФЗШ більш детально розглянуто у [4]. Згідно з [4], за своїм принципом дії пристрої ДФЗШ реагують на співвідношення між фазами струмів приєднань у будь-яких режимах ЕЕС, причому пошкодження, що виникають у межах зони дії даного типу РЗ, тобто на системі

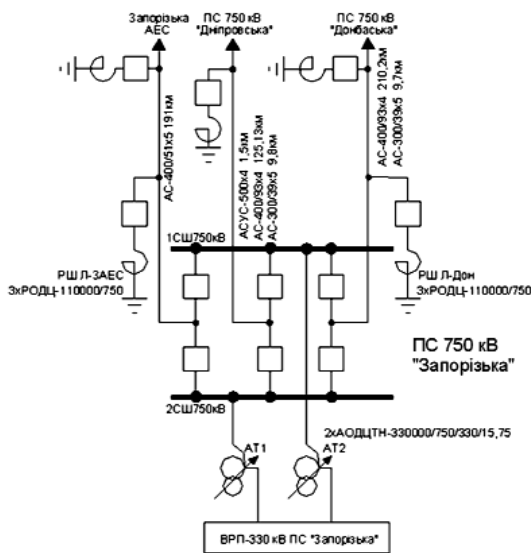


Рис. 1. Однолінійна принципова схема РУ 750 кВ ПС "Запорізька" та прилеглої до неї ЕМ

ЗШ, виявляються останнім за збігом фаз струмів усіх приєднань, підключених до цієї системи ЗШ, якими забезпечується підживлення дуги короткого замикання (КЗ).

Як зазначається у [3], ємнісний струм, що генерується ПЛ напругою 330–750 кВ, може дещо спотворювати фазу сумарного струму (геометрична сума векторів ємнісного струму ПЛ та індуктивного струму КЗ) на кожному кінці даної ПЛ у разі її пошкодження. Ступінь цього спотворення визначається співвідношенням між величиною струму КЗ, що має переважно індуктивний характер [5], та ємнісного струму ПЛ, тобто чим більше величина ємнісного струму та менше величина аварійного струму, тим більше ступінь спотворення його фази за рахунок впливу ємності. Отже, ємнісна провідність вказаних ПЛ певним чином здатна впливати на визначення дійсних співвідношень між фазами струмів на різних кінцях цих ПЛ. Відповідно до [3], вплив ємнісного струму може призводити до порушення роботи диференційно-фазних високочастотних захистів (ДФЗ ВЧ) ПЛ та направлено високо частотного блокування (ВЧБ).

Актуальність теми. Варто відзначити, що попереднє ствердження стосується лише впливу ємнісної провідності ПЛ напругою 330–750 кВ на

функціонування ДФЗ ВЧ, у яких порівняння фаз струмів по кінцях ПЛ здійснюється шляхом застосування комбінованих сигналів I_1+kI_2 , сформованих комбінованими фільтрами симетричних складових із трьохфазної системи струмів ІА, ІВ, ІС [6]. Ступінь та наслідки вказаного впливу вже неодноразово досліджувались раніше при розробці робочих алгоритмів ДФЗ ВЧ [1, 3], що обумовило, на підставі результатів цих досліджень, необхідність застосування у комплекті ДФЗ ВЧ ПЛ напругою 330–750 кВ спеціального органу компенсації ємнісного струму [3].

Оскільки застосування пристроїв ДФЗШ, у яких принцип порівняння фаз струмів застосовано у якості єдиного засобу із забезпечення абсолютно селективної дії захисту у будь-яких режимах ЕЕС, є принципово новим науково-технічним рішенням, запропонованим авторами статті [4], жодних попередніх досліджень впливу ємності ПЛ напругою 330–750 кВ до теперішнього часу не проводилось, то ж основною задачею статті є перевірка розрахунково-аналітичним методом ймовірності впливу ємнісної провідності цих ПЛ на роботу запропонованих пристроїв ДФЗШ, які мають деякі особливості у порівнянні з пристроями ДФЗ ВЧ, що будуть розглянуті далі.

Таким чином, актуальним завданням у разі впровадження в експлуатацію пристроїв ДФЗШ для забезпечення захисту ЗШ напругою 330–750 кВ є встановлення впливу ємнісної провідності ПЛ, підключених до цих шин, на роботу запропонованого типу їх захисту з урахуванням особливостей його застосування для ЗШ у порівнянні з ДФЗ ВЧ.

Мета роботи – дослідження впливу ємнісної провідності протяжних ПЛ надвисокого класу напруги на селективність функціонування диференційно-фазного захисту шин в аварійних режимах енергосистеми.

Матеріали досліджень. Запропонований авторами пристрій ДФЗШ може бути застосовано у якості абсолютно селективного РЗ ЗШ від всіх видів їх пошкоджень з достатньо високою чутливістю та швидкодією, про що було зроблено відповідні висновки у [4]. Особливостями його застосування у порівнянні з пристроями ДФЗ ВЧ є наступні:

- трисистемне виконання вимірювальних кіл захисту, згідно з яким передбачається здійснення роздільного порівняння фаз струмів приєднань у кожній із фаз струмових кіл захисту [7];

- відсутність потреби в організації ВЧ каналу зв'язку, що є характерним для ДФЗ ВЧ [6],

Таблиця 1. Розрахункові параметри елементів ЕМ, зображеної на Рис. 1.

Елемент ЕМ	Розрахунковий параметр			
	L , км (S, МВА; Q , МВАр)	R , Ом	X_L , Ом	X_C , Ом
ПЛ 750 кВ «Запорізька – Донбаська»	218,5 км	4,4	63,3	1162,8
ПЛ 750 кВ «Запорізька – Дніпровська»	134,7 км	2,7	39	1886,8
ПЛ 750 кВ «Запорізька – ЗАЕС»	191,1 км	3,1	54,4	1314,6
АТ1, АТ2, тип АОДЦТН-330000/750/330/15,75	333 МВА	6,9 (ВН) 0,3 (СН)	166,4 (ВН) -1,5 (СН)	-
РШ Л-ЗАЕС, РШ Л-Дон, РШ Л-Зап (на ПС «Дніпровська») тип РОДЦ-110000/750	110 МВАр	-	1877	-



оскільки процес порівняння фаз струмів приєднань у даному випадку здійснюється у межах РУ одного енергетичного об'єкта;

- до систем ЗШ РУ, як правило, підключається значна кількість приєднань (від 3 до 15), що обумовлює неоднаковий струморозподіл між ними у різних режимах ЕЕС (у тому числі і в аварійних режимах), в результаті чого відбувається визначення співвідношень між фазами струмів одночасно декількох приєднань, на відміну від подібного процесу у ДФЗ ВЧ на ПЛ, що можуть мати лише декілька відгалужень (ПЛ напругою 110–220 кВ), або зовсім їх не мають (ПЛ напругою 330 кВ та вище), тобто є двокінцевими ПЛ;

- процес фазової модуляції (перетворення вторинних струмів приєднань у прямокутні одиничні імпульси напруги позитивної та негативної полярності певної тривалості та скважності) має певні особливості [4], що обумовлені застосуванням параметра рівня формування імпульсів та їх наступним подовженням, про що більш детально розглянуто у [8];

Наявність вищеперелічених особливостей ДФЗШ певним чином відрізняє алгоритм його функціонування від аналогічного алгоритму дії ДФЗ ВЧ, призначеного для захисту ПЛ.

Для того, щоб підтвердити або спростувати вплив ємнісної провідності ПЛ надвисокого класу напруги на функціонування пристроїв ДФЗШ в аварійних режимах ЕЕС, а саме при внутрішніх та зовнішніх КЗ, авторами проведено розрахунок аварійних режимів роботи реального енергетичного об'єкта та прилеглої до нього ЕМ. У якості такого об'єкта було обрано вузлову системну підстанцію (ПС) 750/330/15,75 кВ "Запорізька", що є однією з найпотужніших ПС в об'єднаній електроенергетичній системі (ОЕС) України, встановлена потужність якої становить 2000 МВА, та є основою системоутворюючою ПС у Дніпровській електроенергетичній системі (ДнЕС). Однолінійна принципова схема РУ 750 кВ ПС "Запорізька" та прилеглої до неї ЕМ, що досліджувалась, наведена на Рис. 1.

Як показано на Рис. 1, до ЗШ РУ 750 кВ підключено три ПЛ та дві трифазні групи силових автотрансформаторів (АТ) одиничною потужністю 333 МВА кожен. До кожної ПЛ

750 кВ, з однієї або з двох її сторін, як це показано на Рис. 1, підключені шунтуючі реактори (РШ), призначені для компенсації ємнісної провідності цих ПЛ та, тим самим, підвищення їх пропускної здатності і попередження виникнення перенапруг на шинах ПС, що з'єднані цими ПЛ [1]. Розрахункові параметри вищеперелічених елементів ЕМ, зображеної на Рис. 1, за наданою ДнЕС довідковою інформацією наведені у Табл. 1.

Згідно [3], при виконанні аналізу та наближеного розрахунку впливу ємнісного струму ПЛ надвисокого класу напруги на фазу сумарного аварійного струму при КЗ, розподілену ємність кожної із фаз цих ПЛ, як правило, замінюють зосередженою ємністю за Т-подібною, або за П-подібною схемами. Застосування вказаного допущення дозволяє спростити розрахунок результуючих опорів елементів схеми заміщення ЕМ. У статті була застосована П-подібна схема заміщення розподіленої ємності ПЛ 750 кВ.

Також у наближених розрахунках аварійних режимів допускаємо, що шини 750 кВ суміжних ПС та шини 330 кВ ПС "Запорізька" є джерелами напруги нескінченної потужності [5], що дозволяє знехтувати залежністю фази сумарного струму КЗ від характеру та величини опору енергосистем приєднань з живленням, тобто прийняти $X_C = 0$, а отже і відношення $X_C/X_C = 0$. На Рис. 2 наведена розрахункова схема ЕМ, що досліджується (Рис. 2, а), та схема її заміщення (Рис. 2, б).

Метою розрахунку аварійних режимів внутрішнього КЗ (у точці К1, на шинах 750 кВ ПС "Запорізька") та зовнішнього КЗ (у точці К2, на шинах 330 кВ ПС "Запорізька") є встановлен-

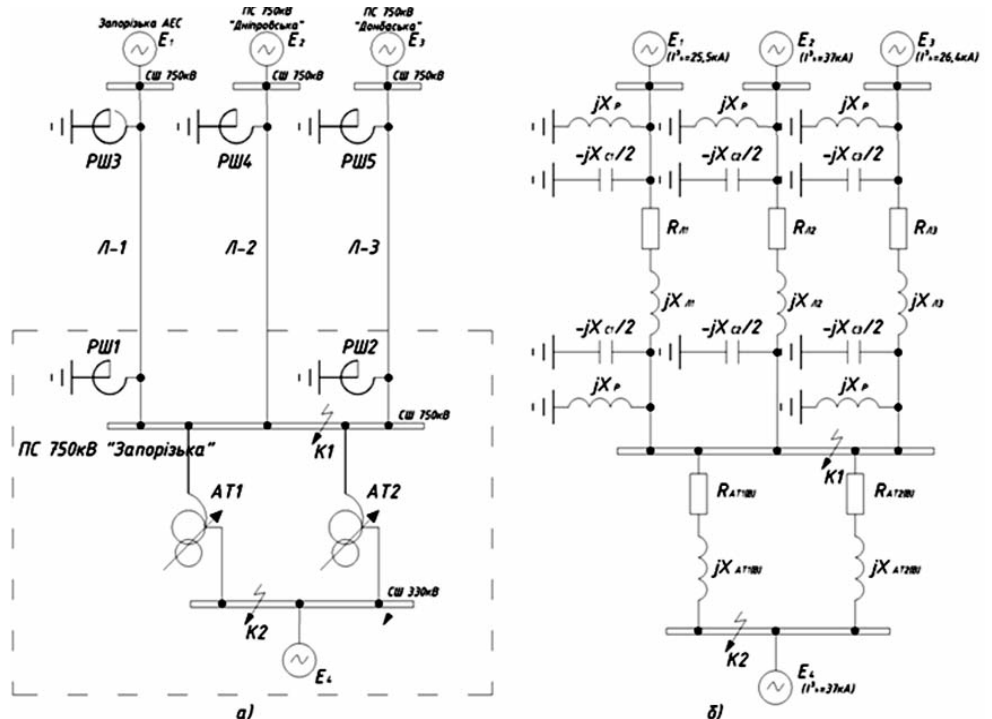


Рис. 2. Розрахункова схема досліджуваної ЕМ (а) та схема її заміщення (б)

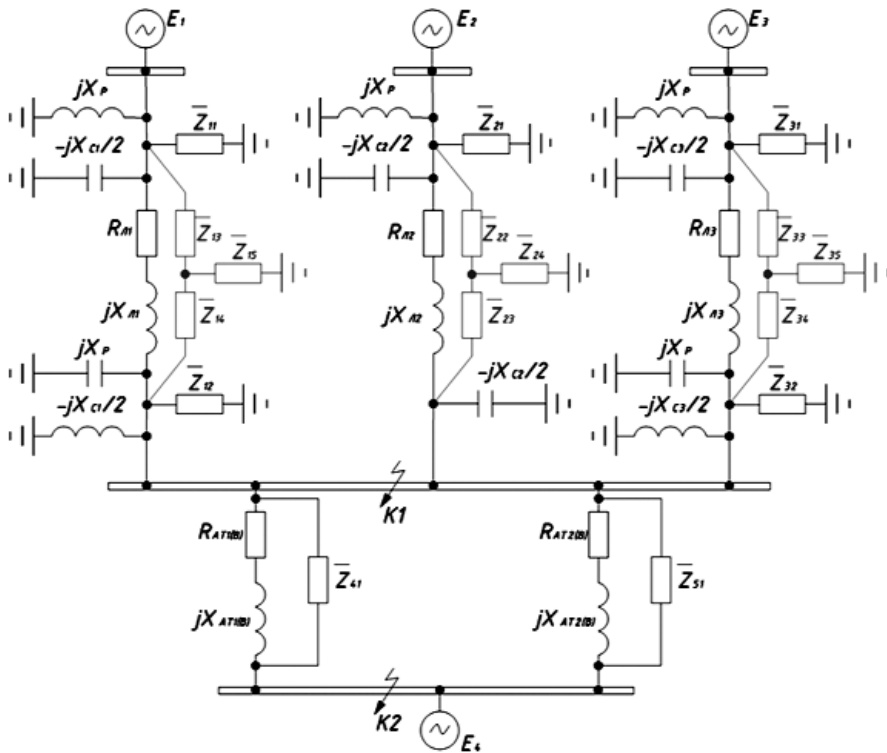


Рис. 3. Перетворення схеми заміщення досліджуваної ЕМ

ня максимального значення різниці між фазами аварійних струмів підживлення КЗ, які протікають усіма приєднаннями у вказаних режимах.

Розрахунок аварійних режимів було проведено за двох наступних умов:

- з увімкненими у роботу РШ на усіх ПЛ 750 кВ (з компенсацією ємнісної провідності);
- з вимкненими РШ на усіх ПЛ 750 кВ (без компенсації ємнісної провідності).

Для розрахунку комплексних величин результуючих опорів елементів схеми заміщення ЕМ, наведеної на Рис. 2, б, було здійснено її первинне перетворення так, як це показано на Рис. 3.

1. Розрахунок впливу ємнісної провідності ПЛ 750 кВ на фазу сумарного струму КЗ при увімкнених РШ (з компенсацією ємнісної

провідності). Опори елементів перетвореної схеми заміщення ЕМ, наведеної на Рис. 3, в аварійних режимах з увімкненими РШ розраховані за виразами (2–6).

Опори ПЛ 750 кВ "Запорізька-ЗАЕС" (Л-1, Рис. 2) можна визначити за наступними виразами [5], Ом:

$$Z_{11} = Z_{12} = \frac{jX_p \left(-j \frac{X_{C1}}{2} \right)}{jX_p - j \frac{X_{C1}}{2}}, \quad (2)$$

$$Z_{13} = \frac{(R_{Л1} + jX_{Л1})Z_{11}}{(R_{Л1} + jX_{Л1}) + Z_{11} + Z_{12}}, \quad (3)$$

$$Z_{14} = \frac{(R_{Л1} + jX_{Л1})Z_{12}}{(R_{Л1} + jX_{Л1}) + Z_{11} + Z_{12}}, \quad (4)$$

$$Z_{15} = \frac{Z_{11}Z_{12}}{(R_{Л1} + jX_{Л1}) + Z_{11} + Z_{12}}, \quad (5)$$

Опори двох інших ПЛ 750 кВ розраховуються аналогічно. При розрахунку опорів ПЛ 750 кВ "Запорізька-Дніпровська" (Л-2, Рис. 2) за виразами (2–5) не враховується індуктивний опір РШ зі сторони ПС "Запорізька" через їх відсутність. Опори обох АТ 750/330/15,75 кВ визначаються за наступним виразом [5], Ом:

$$Z_{41} = Z_{51} = (R_{ВН} + R_{СН}) + j(X_{ВН} + X_{СН}) \quad (6)$$

Перетворимо наведену на Рис. 3 схему заміщення до більш простішого вигляду, як це показано на Рис. 4.

Тоді результуючі опори приєднань ПЛ 750 кВ зображеної на Рис. 4 схеми заміщення ЕМ можна розрахувати за наступними виразами [5], Ом:

$$Z_{16} = \frac{Z_{13}Z_{15}}{Z_{13} + Z_{15}} + Z_{14}, \quad (7)$$

$$Z_{25} = \frac{Z_{22}Z_{24}}{Z_{22} + Z_{24}} + Z_{23}, \quad (8)$$

$$Z_{36} = \frac{Z_{33}Z_{35}}{Z_{33} + Z_{35}} + Z_{34}, \quad (9)$$

Всі проміжні та кінцеві результати розрахунку еквівалентних опорів елементів перетворених схем заміщення ЕМ зведено до Табл. 2.

Виразимо усі розраховані опори приєднань 750 кВ у комплексній формі запису по типу

$$\bar{Z}_i = |Z| e^{j\varphi} \quad [5]:$$

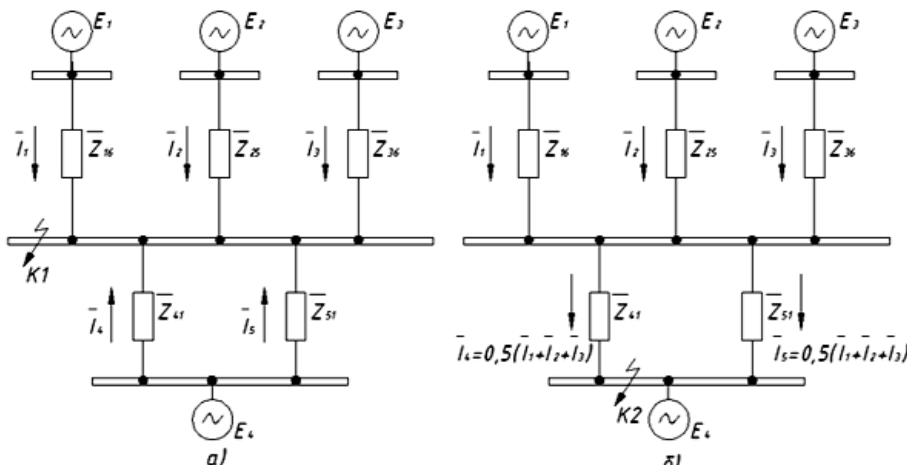


Рис. 4. Перетворення схеми заміщення ЕМ: а) для розрахунку внутрішнього КЗ; б) для розрахунку зовнішнього КЗ



$$Z_{16} = 68,5 e^{j85,6}, Z_{25} = 40,8 e^{j85,9}, Z_{36} = 40,8 e^{j86,7}, Z_{41} = Z_{51} = 166,8 e^{j87,6} \text{ (Ом)}$$

Як бачимо із проведених розрахунків, аварійні струми, що протікають пошкодженими фазами усіх приєднань з підживленням КЗ, мають переважно індуктивний характер за рахунок більшого індуктивного опору ПЛ 750 кВ у порівнянні з їх активним опором, при цьому ємність цих ПЛ та індуктивний опір РШ у пошкоджених фазах фактично "вишунтовуються" зі схеми ЕМ, тобто не обтікаються струмом КЗ та, як наслідок, не впливають на його фазу.

На підставі отриманих розрахункових даних встановлюємо, що при внутрішніх КЗ (точка К1 на Рис. 2) максимальне значення розбіжності між фазами аварійних струмів різних приєднань, що обумовлена відмінністю їх електричних параметрів, становитиме:

$$\Delta \varphi_{\max} = \varphi_{\max} - \varphi_{\min} \quad (10)$$

де φ_{\max} , φ_{\min} – максимальне та мінімальне значення імпедансного кута приєднань при внутрішніх КЗ.

$$\Delta \varphi_{\max K1} = 87,6^\circ - 85,6^\circ = 2^\circ,$$

З урахуванням того, що уставка кута блокування ДФЗШ, згідно з проведеними у [9] дослідженнями, обирається рівною 90° , можна зробити висновок, що ємнісна провідність ПЛ напругою 750 кВ при увімкнених РШ ніяким чином не впливає на селективне функціонування пристроїв ДФЗШ, а зокрема у даному разі виконуватиметься умова спрацювання захисту [10]:

$$\Delta \varphi_{\max K1} < (180^\circ - \varphi_{\text{бл}}), \quad (11)$$

де $\varphi_{\text{бл}}$ – параметр кута блокування ДФЗШ, уставка якого відповідно до [9], приймається рівною 90° .

При зовнішніх КЗ, як це показано на Рис. 4, б, аварійні струми, що протікають приєднаннями до ЗШ 750 кВ, розподіляються між ними нерівномірно, а зокрема приєднаннями АТ1 та АТ2 протікатиме сумарний струм підживлення КЗ від усіх ПЛ 750 кВ. Розрахуємо для цього випадку еквівалентний опір усіх приєднань, якими здійснюється підживлення зовнішнього КЗ (у точці К2, на Рис. 2) від енергосистеми на напрузі 750 кВ через АТ1 та АТ2, за наступними виразами [5]:

$$\frac{1}{Z_{\text{екв}}} = \frac{1}{Z_{16}} + \frac{1}{Z_{25}} + \frac{1}{Z_{36}}, \quad (12)$$

$$\frac{1}{Z_{\text{екв}}} = \frac{1}{5,2 + j68,3} + \frac{1}{2,9 + j40,6} + \frac{1}{3,3 + j58} = 0,003836 - j0,03349 \text{ (Ом)}$$

Таблиця 2. Результати розрахунку опорів елементів схеми заміщення ЕМ для режиму роботи ПЛ 750 кВ з увімкненими РШ

Z ₁₁ , Ом	Z ₁₂ , Ом	Z ₁₃ , Ом	Z ₁₄ , Ом	Z ₁₅ , Ом	Z ₂₁ , Ом	Z ₂₂ , Ом
-j842,3	-j842,3	2,37+j32,8	2,37+j32,8	-1,2-j437	-j1896,7	1,8+j26,4
Z ₂₃ , Ом	Z ₂₄ , Ом	Z ₃₁ , Ом	Z ₃₂ , Ом	Z ₃₃ , Ом	Z ₃₄ , Ом	Z ₃₅ , Ом
0,9+j13,1	-0,6-j638	-j1011,5	-j1011,5	1,6+j28	1,6+j28	-0,8-j519
Z ₄₁ , Ом	Z ₅₁ , Ом	Z ₁₆ , Ом	Z ₂₅ , Ом	Z ₃₆ , Ом		
6,9+j166,4	6,9+j166,4	5,2+j68,3	2,9+j40,6	3,3+j58		

Для приєднань АТ1 та АТ2:

$$Z_{\text{екв}} + \frac{Z_{41}}{2} = 3,38 + j29,5 + \frac{6,9 + j166,4}{2} = 6,83 + j112,7 = 112,9 e^{j85,6} \text{ (Ом)} \quad (Z_{41} = Z_{51})$$

Для приєднань ПЛ 750 кВ:

$$Z_{16} + \frac{Z_{41}}{2} = 5,2 + j68,3 + \frac{6,9 + j166,4}{2} = 8,65 + j151,5 = 151,7 e^{j86,7} \text{ (Ом)},$$

$$Z_{25} + \frac{Z_{41}}{2} = 2,9 + j40,6 + \frac{6,9 + j166,4}{2} = 6,35 + j123,8 = 124 e^{j87,1} \text{ (Ом)},$$

$$Z_{36} + \frac{Z_{41}}{2} = 3,3 + j58 + \frac{6,9 + j166,4}{2} = 6,75 + j141,2 = 141,4 e^{j87,3} \text{ (Ом)}.$$

Подібно розглянутому режиму внутрішнього КЗ встановлюємо максимальне значення розбіжності між фазами аварійних струмів різних приєднань при зовнішньому КЗ за виразом (10):

$$\Delta \varphi_{\max K2} = 87,3^\circ - 86,5^\circ = 0,8^\circ,$$

Умовою для неспрацювання ДФЗШ при зовнішніх КЗ, відповідно до [10], є наступна:

$$(180^\circ - \Delta \varphi_{\max K2}) \geq \varphi_{\text{бл}}$$

$$(180^\circ - \Delta \varphi_{\max K2}) = 179,2^\circ \geq 90^\circ, \quad (13)$$

З виразу (13) видно, що умова блокування дії ДФЗШ при зовнішніх КЗ у даному разі виконується, тобто селективна дія захисту не порушується, що дозволяє спростувати вплив ємнісної провідності ПЛ 750 кВ на функціонування пристроїв ДФЗШ в аварійних режимах з увімкненими в мережу РШ.

2. Розрахунок впливу ємнісної провідності ПЛ 750 кВ на фазу сумарного струму КЗ при вимкнених РШ (без компенсації ємнісної провідності).

Розрахунок виконано аналогічно попередньому, а саме за тією ж методикою, схемами заміщення елементів ЕМ та формулами. Його відмінність полягає лише у тому, що при визначенні еквівалентних опорів ПЛ 750 кВ не враховувався індуктивний опір вимкнених РШ, тобто вираз (2) матиме у даному разі наступний вигляд [5]:

$$Z_{11} = Z_{12} = -j(X_{C1}/2). \quad (14)$$

Всі проміжні та кінцеві результати розрахунку еквівалентних опорів ПЛ 750 кВ без увімкнених РШ та АТ зведені до Табл. 3.



Таблиця 3. Результати розрахунку опорів елементів схеми заміщення ЕМ для режиму роботи ПЛ 750 кВ з вимкненими РШ

$Z_{11,OM}$	$Z_{12,OM}$	$Z_{13,OM}$	$Z_{14,OM}$	$Z_{15,OM}$	$Z_{21,OM}$	$Z_{22,OM}$
-j581,4	-j581,4	2,46+j33	2,46+j33,5	-1,2-j307	-j943,4	1,4+j19,9
$Z_{23,OM}$	$Z_{24,OM}$	$Z_{31,OM}$	$Z_{32,OM}$	$Z_{33,OM}$	$Z_{34,OM}$	$Z_{35,OM}$
1,4+j19,9	-0,7-j481	-j657,3	-j657,3	1,7+j28	1,7+j28,4	-0,84-j342,8
$Z_{41,OM}$	$Z_{51,OM}$	$Z_{16,OM}$	$Z_{25,OM}$	$Z_{36,OM}$	$Z_{екв,OM}$	$Z_{екв}+Z_{41}/2,OM$
6,9+j166,4	6,9+j166,4	3,1+j37,6	1,5+j20,8	2+j31	0,68+j9,4	4,13+j92,6
$Z_{16}+Z_{41}/2,OM$		$Z_{25}+Z_{41}/2,OM$		$Z_{36}+Z_{41}/2,OM$		
6,55+j120,8		4,95+j104		5,45+j114,2		

Виразимо усі розраховані опори приєднань 750 кВ у комплексній формі запису по типу $\bar{Z}_i = |Z| e^{j\varphi}$ [5]:

$$Z_{16} = 37,7 e^{j85,3}, Z_{25} = 20,9 e^{j85,9}, Z_{36} = 31,1 e^{j86,3},$$

$$Z_{41} = Z_{51} = 166,8 e^{j87,6} \text{ (Ом)},$$

$$Z_{екв} + Z_{41}/2 = 92,7 e^{j87,5} \text{ (Ом)},$$

$$Z_{16} + Z_{41}/2 = 121 e^{j86,9} \text{ (Ом)},$$

$$Z_{25} + Z_{41}/2 = 104,1 e^{j87,3} \text{ (Ом)},$$

$$Z_{36} + Z_{41}/2 = 114,3 e^{j87,3} \text{ (Ом)}.$$

Як бачимо із проведених вище розрахунків, умови протікання процесів внутрішнього та зовнішнього КЗ при вимкнених РШ практично не відрізняються від попередніх розрахунків тих самих режимів за увімкнених РШ, а саме:

$$\Delta \varphi_{\max K1} = 87,6^\circ - 85,3^\circ = 2,3^\circ,$$

$$\Delta \varphi_{\max K2} = 87,5^\circ - 86,9^\circ = 0,6^\circ,$$

У даному разі також забезпечуватиметься абсолютна селективність дії ДФЗШ, тобто виконуватиметься умова його спрацювання (11) при внутрішніх КЗ та умова його блокування (13) при зовнішніх КЗ:

$$\Delta \varphi_{\max K1} = 2,3^\circ < 90^\circ,$$

$$(180^\circ - \Delta \varphi_{\max K2}) = 179,4^\circ \geq 90^\circ,$$

Таким чином, можемо стверджувати, що в аварійних режимах ЕЕС при вимкнених РШ, тобто за відсутності компенсації ємнісної провідності ПЛ надвисокого класу напруги, остання також не здійснюватиме жодного впливу на процес порівняння фаз струмів приєднань пристроями ДФЗШ у цих режимах, на відміну свого впливу на роботу пристроїв ДФЗ ВЧ цих ПЛ, виконаних за аналогічним принципом дії, про що було відзначено на початку статті.

Висновки. Отже, підсумовуючи отримані розрахунково-аналітичним методом результати проведеного дослідження, можна зробити висновок, що ємнісна провідність ПЛ надвисокої напруги не призводить до порушення селективної дії ДФЗШ в аварійних режимах ЕЕС, що підтверджується виконанням умови спрацювання захисту при внутрішніх КЗ та умови його неспрацювання при зовнішніх КЗ. Встановлено, що сумарний аварійний струм підживлення КЗ має пере-

важно індуктивний характер ($\varphi_i = 85-88^\circ$) за рахунок переважного впливу індуктивного опору ПЛ та обмоток АТ, при цьому розподілена ємність ПЛ фактично "вишунтовується" із контуру протікання аварійного струму та, як наслідок, не здійснює жодного впливу на

його фазу, що дозволяє не враховувати ємнісну провідність ПЛ надвисокої напруги при розрахунку уставки параметра кута блокування пристроїв ДФЗШ, а також не застосовувати додаткових засобів (алгоритмів) з компенсації ємнісного струму цих ПЛ у ДФЗШ.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Рыжов Ю.П.* Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения : Учебник для вузов / Ю. П. Рыжов. — М. : Издательский дом МЭИ, 2007. — 488 с.
2. *Идельчик В.И.* Электрические системы и сети : Учебник для вузов/В.И. Идельчик. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 592 с.
3. *Андреев В.А.* Релейная защита и автоматика систем электроснабжения / В. А. Андреев. — М. : Высш. шк., 2006. — 639 с.
4. *Ниценко В.В.* Підвищення ефективності дії пристроїв релейного захисту збірних шин розподільчих установок енергетичних об'єктів / В. В. Ніценко, Д. О. Кулагін // Промислова електроенергетика та електротехніка. — К. : ТОВ "Етін", 2017. — Вип. 2/2017. — С. 27–33. — ISSN 2409-2924. - Режим доступу: <http://promelektro.com.ua/archive.html>.
5. *Веников В.А.* Переходные электромеханические процессы в электрических системах : Учеб. для электроэнергет. спец. вузов/В.А. Веников. — М. : Высш. школа, 1985. — 536 с.
6. *Будаев М.И.* Высоочастотные защиты линий 110-220 кВ / М. И. Будаев. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 112 с.
7. *Ниценко В.В.* Дослідження методів реалізації вимірювальних кіл диференційно-фазного захисту збірних шин / В.В. Ніценко, Д.О. Кулагін // Електротехнічні та комп'ютерні системи. — 2017. — Вип. 24 (100). — С. 28 – 38. — ISSN 2221-3805. Режим доступу: <http://www.etks.opu.ua/?fetch=articles&with=topic&id=24>
8. *Ниценко В. В.* Розробка засобів підвищення селективності дії диференційно-фазного захисту збірних шин при насиченні трансформаторів струму / В. В. Ніценко, Д. О. Кулагін, П. В. Махлін // Енергетика: економіка, технології, екологія. — К. : НТУУ КПІ, 2016. — Вип. 4/2016. — С. 43–52. — ISSN 2308–7382. — <http://energy.kpi.ua/article/view/98443>.
9. *Ниценко В.В.* Исследование основных расчетных параметров дифференциально-фазной защиты сборных шин энергообъектов и факторов электрической сети, оказывающих влияние на их выбор / В.В. Ниценко, Д.А. Кулагин, П.В. Махлин, А.Н. Климко // Електротехніка та електроенергетика. — Запоріжжя : ЗНТУ, 2015. — Вип. 2/2015. — С. 87–94. — ISSN 1607-6761. — [http://journal.zntu.edu.ua/et/files/-ET22015/ET\(2\)_2015.pdf](http://journal.zntu.edu.ua/et/files/-ET22015/ET(2)_2015.pdf)
10. *Ниценко В.В.* Перспективы использования дифференциально-фазного принципа для защиты систем сборных шин распределительных устройств 110–750 кВ / Ниценко В. В., Кулагин Д. А. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. — Кременчук : КрНУ, 2015. — Вип. 3/2015 (31). — С. 158–166. — ISSN 2074-9937. — http://ees.kdu.edu.ua/wp-content/uploads/2015/10/020_158-166_Ниценко_Кулагин.pdf

© Ніценко В.В., Кулагін Д.О., Махлін П.В., 2017