

УДК 621.316.925

М. Й. Бурбело, д-р техн. наук, проф.;
С. М. Мельничук, асп.

ПУЛЬСУЮЧА ПОТУЖНІСТЬ ЯК КРИТЕРІЙ АВАРІЙНОГО РЕЖИМУ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЮ СИСТЕМОЮ ТА СОНЯЧНИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ

Обґрунтовано інформативні параметри для виявлення коротких замикань та несиметричних пошкоджень ліній електропередавання, прилеглих до об'єктів малої енергетики.

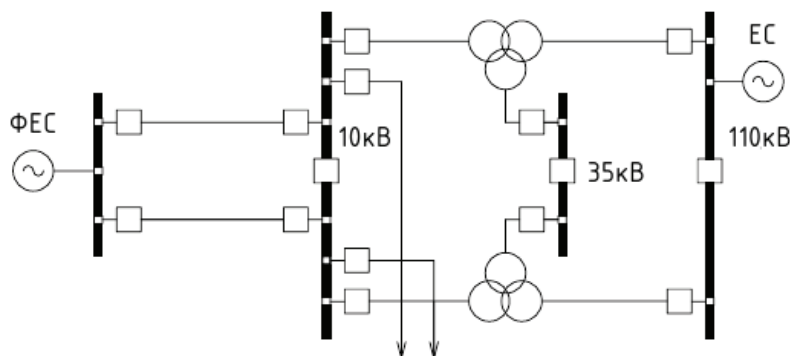
Вступ

Після введення в Україні «зеленого» тарифу розпочався бурхливий розвиток сонячної генерації. Так, на території Вінницької області за період з 2012 по 2014 роки планується ввести в експлуатацію більше 20 сонячних фотоелектричних станцій (ФЕС) із загальною встановленою потужністю до 150 МВт (об'єкти потужністю від 0,5 до 44 МВт). Приєднання ФЕС здійснюватиметься, як правило, до шин 10 кВ існуючих підстанцій ПС 110/10 кВ, 110/35/10 кВ ПАТ «Вінницяобленерго» з використанням двоколових кабельних ліній (КЛ) 10 кВ, виконаних кабелем із зшитого поліетилену.

З підключенням ФЕС та інших об'єктів малої енергетики на паралельну роботу з електроенергетичною системою виникає низка проблем в напрямку забезпечення стійкості енергосистеми, керування рівнями напруг у вузлах та організації принципів побудови пристроїв релейного захисту та автоматики. Під час роботи сонячних чи вітрових електростанцій потужність, що генерується в електромережу, не є сталою величиною, а коливається в залежності від природних факторів — світлового потоку чи сили вітру, відповідно. У разі зміни освітленості та температури фотоелементів змінюється вихідна вольт-амперна характеристика станції. Також значно ускладнює розрахунки той факт, що у разі КЗ сонячної батареї різко падає потужність, що нею генерується [1, 2].

Виконання захистів приєднань, що живляться від шин ПС ФЕС, в режимах поперечної та поздовжньої несиметрії

Як розрахунковий приклад розглянуто проект приєднання ФЕС потужністю 15 МВт до шин 10 кВ ПС 110/35/10 кВ «Шаргород» Вінницької області (рис.).



Приєднання ФЕС до шин 10 кВ ПС 110/35/10 кВ

Для захисту лінії електропередавання між енергосистемою і об'єктом малої енергетики, крім максимального струмового захисту та струмової відсічки, рекомендується використовувати два комплекси захисту, що встановлені з обох сторін лінії. У кожному з комплексів мають бути три види захисту [3]:

1. Захист від симетричного зниження напруги в усіх фазах;
2. Захист від підвищення напруги зворотної послідовності;
3. Подільний захист від зниження частоти (та підвищення частоти).

Захисти мережі 6—10 кВ, зазвичай, виконані ненаправленими і розраховані на роботу в розімкненому радіальному режимі. Але за наявності паралельних ліній, кільцевих схем та схем з двостороннім живленням ненаправлені захисти не забезпечують вимог щодо селективності та чутливості [4, 5].

Розглянемо ситуацію, коли на одній з ЛЕП, що відходять від шин 10 кВ до споживачів, відбувається близьке КЗ. Зниження напруги залежить від декількох факторів, які важко передбачити, а саме: режиму роботи мережі, потужності, що генерується ФЕС, потужності, що споживається споживачами. При цьому знижується напруга як на шинах 10 кВ ПС 110/35/10, так і на шинах РП-10 кВ ФЕС. Виникає також імовірність неправильної роботи захистів від зниження напруги та можливість зайвого відключення ФЕС. Щоб запобігти цьому, слід розробити і встановити чутливий та селективний тип захисту на лініях, якими ФЕС під'єднана до енергосистеми.

Обґрунтування результатів

В табл. 1 наведені результати розрахунків струмів і напруг фаз при двофазному КЗ фаз ВС для випадків, коли ФЕС працює на повну потужність і коли станція видає потужність, яка рівна половині від номінальної. Несиметричність режимів характеризується міжфазним комплексним опором Z_{bc} фаз ВС, пульсуючою потужністю та різницею пульсуючих потужностей

$$\underline{N} = 3(\dot{U}_1 \dot{I}_2 + \dot{U}_2 \dot{I}_1); \Delta \underline{N} = 3(\dot{U}_1 \dot{I}_2 - \dot{U}_2 \dot{I}_1), \quad (1)$$

де $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_1, \dot{I}_2$ — комплексні напруги та струми, відповідно, прямої та зворотної послідовностей.

Таблиця 1

Результати розрахунків режимів КЗ

Величина	КЗ на початку лінії		КЗ в кінці лінії	
	15	7,5	15	7,5
$S_{\text{дов}}, \text{МВ}\cdot\text{А}$				
$U_A, \text{В}$	5760 $\angle 1,5^\circ$	5995 $\angle 0,75^\circ$	5744 $\angle 1,7^\circ$	5985 $\angle 0,8^\circ$
$U_B, \text{В}$	437 $\angle -106^\circ$	239 $\angle -105^\circ$	364 $\angle -95^\circ$	187 $\angle -96^\circ$
$U_C, \text{В}$	437 $\angle -106^\circ$	239 $\angle -105^\circ$	492 $\angle 164^\circ$	255 $\angle 164^\circ$
$I_A, \text{А}$	661 $\angle -21,7^\circ$	320,5 $\angle -23^\circ$	672 $\angle -25^\circ$	323 $\angle -25^\circ$
$I_B, \text{А}$	973 $\angle -130^\circ$	492 $\angle -130^\circ$	975 $\angle -134^\circ$	493 $\angle -134^\circ$
$I_C, \text{А}$	991 $\angle 89^\circ$	498 $\angle 87^\circ$	976 $\angle 86^\circ$	492 $\angle 84^\circ$
$Z_{bc}, \text{Ом}$	0	0	0,363 $\angle 66^\circ$	0,363 $\angle 66^\circ$
$N, \text{Мвар}$	1,302	0,648	1,193	0,620
$\Delta N, \text{Мвар}$	2,103	1,094	2,017	1,072
$\Delta N/S$	0,412	0,419	0,361	0,393

Оскільки номінальний струм ФЕС складає 866 А, то застосування струмових захистів є дуже проблематичним.

З результатів розрахунків (див. табл. 1) випливає, що для поперечної несиметрії (КЗ фаз ВС) доцільно застосовувати дистанційний захист, робота якого не залежить від доаварійного режиму та значення потужності, що видається ФЕС.

Перспективним може виявитись захист, реалізований на використанні різниці пульсуючої потужності ΔN та відношенні різниці пульсуючої потужності до повної потужності $\Delta N/S$, значення якого в нормальному несиметричному режимі не перевищує 0,1 (10 %).

Розглянемо можливість використання цих величин для виявлення КЗ на холостому ході та неповнофазного режиму лінії, що відходить від РП-10 кВ ФЕС, в різних режимах генерування потужності (табл. 2).

Таблиця 2

Результати розрахунків несиметричних аварійних режимів

Величина	Несиметрія навантаження		КЗ лінії на холостому ході		Обрив фази А	
	15	7,5	15	7,5	15	7,5
$S_{\text{дов}}, \text{МВ}\cdot\text{А}$						
$U_1, \text{В}$	5335	5593	2755	2600	6133	6270
$I_1, \text{А}$	845	417	563	284	454	225
$U_2, \text{В}$	61,8	52,2	2457	2449	739	598

Продовження табл. 2

Величина	Несиметрія навантаження		КЗ лінії на холостому ходу		Обрив фази А	
	I_2 , А	40,9	21,7	563	284	454
Z_{ab} , Ом	6,517∠30°	13,821∠29°	7,768∠-64°	15,128∠-66°	14,142∠-40°	29,057∠-39°
Z_{bc} , Ом	6,492∠24°	13,795∠23°	0,363∠66°	0,363∠66°	5,957∠27°	12,621∠26°
Z_{ca} , Ом	5,957∠27°	12,621∠26°	8,261∠111°	15,621∠112°	14,618∠90°	29,532∠90°
N , Мвар	0,167	0,099	0,230	0,059	2,454	1,267
ΔN , Мвар	0,269	0,143	2,927	1,435	3,114	1,544
$\Delta N/S$	0,020	0,020	0,630	0,647	0,373	0,365

Коротке замикання фаз ВС можна чітко виявити за значенням опору Z_{bc} , різницею пульсуючих потужностей ΔN та відношенням різниці пульсуючих потужностей до повної потужності $\Delta N/S$. Порівняння результатів, наведених в табл. 1 і 2, показує, що значення Z_{bc} не змінилося, а значення ΔN та відношення $\Delta N/S$ навіть збільшилися. Що стосується пульсуючої потужності N , то її значення зменшується у разі КЗ в режимі холостого ходу лінії порівняно з нормальним несиметричним режимом, що виключає можливість використання цієї величини як інформативного параметра.

Для виявлення неповнофазного режиму доцільно побудувати релейний захист, який буде запускатися за фактом перевищення значення відношення різниці пульсуючих потужностей до повної потужності $\Delta N/S$ деякого порогового значення:

$$k_{\Delta N \text{ уст}} = k_{\text{від}} \cdot \Delta N/S, \quad (2)$$

де $k_{\Delta N \text{ уст}}$ — уставка спрацювання захисту за відношенням різниці пульсуючих потужностей до повної потужності; $k_{\text{від}}$ — коефіцієнт відстроювання; S — повна потужність, що протікає по лінії.

У разі необхідності відстройки захисту від спрацювання при міжфазному КЗ можна ввести блокування, яке буде спрацювати у разі зниження хоча б одного із міжфазних опорів нижче доаварійного значення.

Перевіримо, як буде працювати запропонований алгоритм в режимі видачі потужності по двох паралельних лініях зв'язку ФЕС з енергосистемою і у разі обриву фази на одній з них. В доаварійному симетричному режимі по обох лініях в усіх фазах будуть протікати однакові струми. У разі обриву однієї з фаз (наприклад, А) на першій лінії, по фазі А другої лінії буде протікати подвоєний доаварійний струм, але ні для ФЕС, ні для споживачів загальний симетричний режим майже не порушиться (якщо знехтувати тим фактом, що загальний опір обох ліній по фазі А зростає в два рази).

Таблиця 3

Результати розрахунків у випадку обриву фази А на одній з паралельних ліній

Величина	Пошкоджена лінія		Справна лінія	
	$S_{\text{доав}}$, МВ·А	15/2	7,5/2	15/2
U_1 , В	5170	5471	5170	5471
I_1 , А	290	145	579	289
U_2 , В	20	12	20	12
I_2 , А	145	72	144	72
Z_{ab} , Ом	20,7∠-4°	43,8∠-5°	8,73∠36°	16,56∠36°
Z_{bc} , Ом	11,86∠26°	25,19∠25°	13,33∠25°	25,19∠25°
Z_{ca} , Ом	20,6∠56°	43,7∠55°	8,73∠14°	16,51∠15°
N , Мвар	0,746	0,394	0,754	0,398
ΔN , Мвар	0,754	0,397	0,737	0,393
$\Delta N/S$	0,168	0,168	0,082	0,083

Як видно з таблиці 3, значення різниці пульсуючих потужностей на обох лініях практично однакові, але значення міжфазних опорів Z_{ab} та Z_{ca} на пошкодженій лінії зростають, а на справній – зменшуються, збільшується також і відношення різниці пульсуючих потужностей до повної потужності $\Delta N/S$ пошкодженої лінії, і саме за цими фактами можна виявити, на якій з ліній виникла позовжня несиметрія.

Висновки

Встановлено, що для захисту від міжфазних КЗ ЛЕП, що зв'язують ФЕС з енергосистемою, з боку ФЕС доцільно використовувати не струмові, а дистанційні захисти.

За результатами аналізу режимів поздовжньої несиметрії в мережах, які живляться від джерел енергії, близьких за своїми характеристиками до ідеального джерела струму, встановлено, що різниця пульсуючих потужностей може використовуватись як інформативний параметр для виявлення як несиметричних КЗ, так і неповнофазних режимів ЛЕП.

Запропоновано використовувати для захисту від неповнофазних режимів захист за відношенням різниці пульсуючих потужностей до повної потужності ЛЕП в аварійному режимі.

Для відстройки захисту від неповнофазного режиму від зайвого спрацьовування у разі міжфазного КЗ запропоновано використовувати блокування за фактом зниження хоча б одного міжфазного опору.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Г. Раушенбах. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 360 с.
2. Солнечная энергетика: учеб. пос. для вузов / [В. И. Виссарионов, Г. В. Дерюгина, В. А. Кузнецова, Н. К. Малинин] ; под ред. В. И. Виссарионова. — М. : Издательский дом МЭИ, 2008. — 320 с.
3. Беляев А. В. Защита, автоматика и управление на электростанциях малой энергетики (Часть 1) / А. В. Беляев. — М. : НТФ «Энергопрогресс», 2010. — 84 с.
4. Чернобровов Н. В. Релейная защита энергетических систем: учеб. пос. для техникумов / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. — М. : Энергоатомиздат, 1998. — 800 с.
5. Нагай В. И. Релейная защита ответственных подстанций электрических сетей / В. И. Нагай. — М. : Энергоатомиздат, 2002. — 312 с.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

Стаття надійшла до редакції 26.03.2013

Рекомендована до друку 31.01.2013

Бурбело Михайло Йосипович — професор кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Мельничук Сергій Миколайович — інженер Південно-Західної електроенергетичної системи ДП НЕК «Укренерго», Вінниця