

Л. Б. Терешкевич, к. т. н., доц.; В. О. Милосердов, к. е. н., доц.

АНАЛІЗ СИСТЕМНОЇ АВАРІЇ З ПОРУШЕННЯМ ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ

Проаналізовано аварію в енергосистемі з порушенням динамічної стійкості з метою недопущення або мінімізації її наслідків у результаті прийняття оптимальної стратегії дій в подібних ситуаціях.

Ключові слова: об'єднана електроенергетична система, стійкість системи, небаланс потужності, перехідний процес.

Постановка проблеми

Проблема стійкості в електроенергетиці набула важливого значення через об'єднання електричних станцій і мереж на паралельну роботу, тобто з моменту створення електричних систем. [1]. Після низки серйозних аварій в енергосистемах розвинених країн (США, Німеччина, СРСР), пов'язаних із порушенням стійкості, дослідження цієї проблеми визнане пріоритетним. У [2] наголошують, що, наприклад, у системах Мосенерго і Лененерго за період з 1932 по 1934 роки було 38 аварій, зумовлених розладом паралельної роботи. Серйозні ускладнення в підтримці стійкості об'єднаної електроенергетичної системи України вносять дефіцит паливноенергетичних ресурсів, що склався на сьогодні на ТЕС, і як наслідок, віялові відключення споживачів. Дефіцит активної потужності, що виникає через нестачу палива на електростанціях, знижує запас стійкості, призводить до неможливості підтримки номінальної частоти й може призвести за несприятливих умов до порушення статичної стійкості системи за критерієм текучості (сповзання) параметрів режиму у формі "лавини частоти".

У літературі з цієї проблеми [1, 3], окрім констатації фактів порушення стійкості, ніде не вдалося знайти аналіз причин, ходу й наслідків аварій. Без такого аналізу неможливі вдосконалення і підвищення рівня кваліфікації чергового й експлуатаційного персоналу електричних станцій і мереж, а також підготовка та навчання студентів-електроенергетиків.

Мета статті – виявлення і аналіз причин аварії в об'єднаній енергосистемі; представлення хронології розвитку аварії; аналіз реагування засобів протиаварійної автоматики; оцінка технології відновлення стійкого післяаварійного режиму.

Результати дослідження

Розглянемо аварію (червень 1997 г.), яка мала місце в енергосистемі з умовною назвою ОЕ і призвела до порушення енергопостачання споживачів більш, ніж на 10 годин, тому є дуже повчальною. Загальна потужність генерації енергосистеми ОЕ може досягати 1655 МВт, але на час початку аварії фактична генерація складала 339 МВт. Це відображено на рис. 1, з якого видно, що загальне навантаження енергосистеми ОЕ P_n покривалося власною генерацією потужності P_r і потужністю P_t по транзитній ЛЕП- 500 від енергосистеми ОЕУ. Зв'язки з іншими енергосистемами НЕ і БЕ були вимкнені.

Нагадаємо, що нормальний режим, що встановився, у будь-якій енергосистемі можливий тільки за умови забезпечення балансу потужності і, насамперед, активної потужності, яка несе "відповідальність" за частоту в системі. З рис. 1 видно, що в системі ОЕ в передаварійному стані баланс активної потужності строго виконувався, потужність небалансу $P_{нб}$ була відсутня ($P_{нб} = P_n - P_r - P_t = 779 - 339 - 440 = 0$ (МВт)), що забезпечувало частоту в системі 50 Гц.

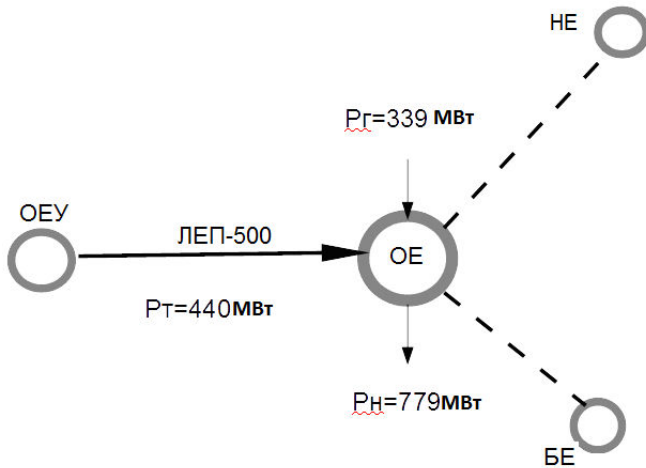


Рис. 1. Принципова схема зв'язку ОЕ з іншими системами

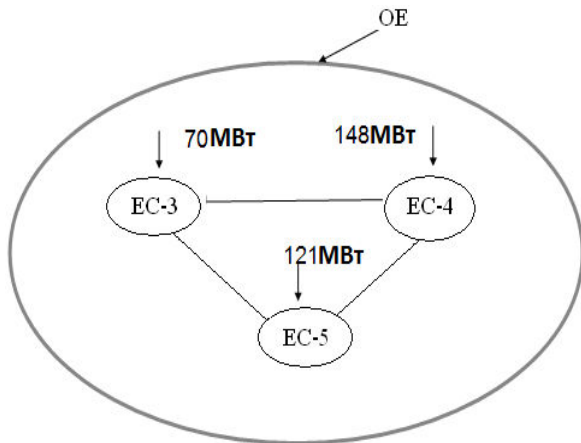


Рис. 2. Розподіл загальної генерації потужності в системі

Загальну генерацію потужності в системі ОЕ в передаварійному режимі забезпечували три паралельно працюючі електростанції ЕС- 3, ЕС- 4 і ЕС- 5 (рис. 2). Зазначимо, що навантаження на шинах цих електростанцій, зважаючи на їхню паралельну роботу, найчастіше не відповідало їхній власній генерації. Початок аварії – 11 год. 56 хв. 40 сек. за місцевим часом, коли сталося вимкнення ЛЕП-500 на живлячому кінці (рис. 1) і енергосистема ОЕ перейшла на ізольовану роботу з потужністю небаланса, яка дорівнює

$$P_{\text{нб}} = P_{\text{н}} - P_{\text{Г}} - P_{\text{Т}} = 779 - 339 = 440 \text{ (МВт)}.$$

Небаланс потужності, що виникає, створює додатковий гальмівний момент для роторів усіх генераторів системи ОЕ. Він залежить від величини небаланса та інерційних характеристик мас, що обертаються. Це призводить до зниження швидкості роторів генераторів і, відповідно, до зменшення частоти.

Потенційна небезпека зниження частоти в системі полягає в тому, що може бути порушена робота механізмів власних потреб електростанцій, таких як: живильні і циркуляційні насоси, дутьєві вентилятори, димососи та ін., привод яких здійснюють електродвигуни. Отже, за умови виникнення небалансу потужності

може розпочатися така низка подій: зниження частоти; зменшення моментів електроприводів, що обертаються; зниження продуктивності механізмів власних потреб і, у гіршому разі, перекидання електродвигунів; повне призупинення роботи електростанцій і припинення енергопостачання споживачів.

Для запобігання такого негативного сценарію в енергосистемах завжди передбачені різноманітні системи автоматики, серед яких автоматичне регулювання швидкості турбін (АРШ), автоматичне частотне розвантаження (АЧР) та інші. АЧР, наприклад, за заздалегідь визначеним алгоритмом забезпечує примусове вимкнення частини споживачів для відновлення балансу активної потужності. Об'єм навантаження, яке вимикають, черговість, тимчасові й частотні уставки АЧР визначають заздалегідь, виходячи з ключової вимоги – збереження стійкості системи. Якщо АЧР забезпечує баланс потужності, можна говорити про сприятливий результат аварії. Інакше неминуче настає порушення стійкості енергосистеми – найтяжчий наслідок аварій.

Розглянемо з цих позицій роботу АЧР на електростанціях системи ОЕ після початку аварії, тобто починаючи з 11 год. 56 хв. 40 с. за місцевим часом. Звернемося до телеметричної інформації і представимо її у вигляді нижченаведеної таблиці 1 і графіків на рис. 3 і рис. 4.

Із таблиці 1 і рис. 3, 4 видно, що:

- система АЧР вступила в роботу через декілька секунд після початку аварії;
- за перші 30 секунд аварії АЧР виробила майже 80 % загального ресурсу вимкнення навантаження;
- надалі робота АЧР характеризується меншою інтенсивністю вимкнення навантаження;
- із початку аварії і до вичерпання закладеного ресурсу АЧР частота в системі спочатку швидко знижувалася, потім дещо стабілізувалася на низькому рівні, а далі монотонно погіршувалася;
- загальний ресурс АЧР, яке вимикають, 280 МВт, що становить близько 36% від навантаження системи в 779 МВт, у цій аварії виявився малим.

Таблиця 1

Телеметрична інформація про стан електричної системи

Час, г. м..	Частота, Гц	Р вимкн., МВт
11.56.4	50.00	0.00
11.56.5	47.52	52.80
11.57.0	48.44	76.00
11.57.1	48.28	92.6
11.57.2	47.96	32.4
11.57.3	47.88	14.00
11.57.4	47.80	0.00
11.57.5	47.80	0.00
11.58.0	47.80	0.00
11.58.1	47.80	0.00
11.58.2	47.80	0.00
11.58.3	47.52	5.10
11.58.4	47.20	1.20
11.58.5	47.08	0.00
11.59.0	47.00	6.00
Всього	Р _{вим.} , МВт	280.1



Рис. 3. Перехідний процес зміни частоти в системі ОЕ

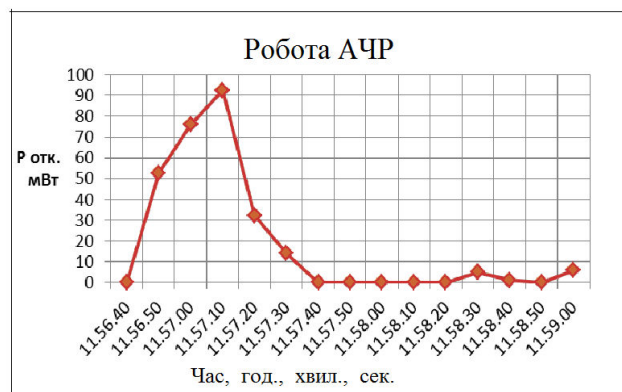


Рис. 4. Динаміка навантаження, яке вимкнено засобами АЧР

З огляду на те, що можливості АЧР виявилися вже вичерпаними, а частота продовжувала зменшуватися, завдяки засобам автоматики і втручання

диспетчерського персоналу система ОЕ стала розділятися на несинхронні частини. Розвиток подій відбувався в такій послідовності:

- 1) об 11 год. 59 хв. 29 с. автоматично виділилася на ізольовану роботу ЕС-3;
- 2) о 12 год. 01 хв. 06 с. повністю скинула навантаження ЕС-4 (на професійному жаргоні "сіла на 0") унаслідок втрати власних потреб;
- 3) о 12 год. 00 хв. 07 с. вимкнено блок № 2 ЕС-5, виділений на навантаження власних потреб;
- 4) о 12 год. 05 хв. 43 с. блок № 5 ЕС-5 вимкнено через низьку частоту.

У результаті цих подій було вимкнено навантаження загальною потужністю 711 МВт,

тобто мав місце повний розлад енергопостачання споживачів через порушення динамічної стійкості системи. Нижче на рис. 5, 6 приведені фрагменти стрічок самописців потужності й частоти ЕС-5, що реєструють телевимірювання на всьому часовому діапазоні аварії в системі.

Видно, що потужність генерації (вертикальна вісь) на рис. 5 зазнає сильної зміни: від нормальної величини 121 МВт (див. рис. 2) до різкого підйому, падіння й подальшої стабілізації на рівні, який забезпечує навантаження власних потреб. Таку зміну потужності треба розглядати разом зі зміною частоти на рис. 6. Як можна пояснити такий великий сплеск генерації на початковому етапі перехідного процесу?

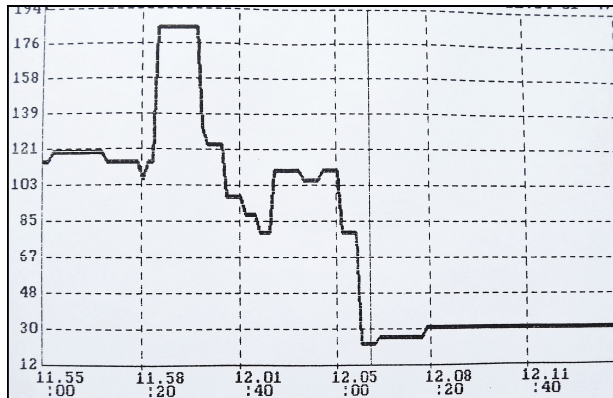


Рис. 5. Динаміка зміни потужності (МВт) ЕС-5 під час аварії

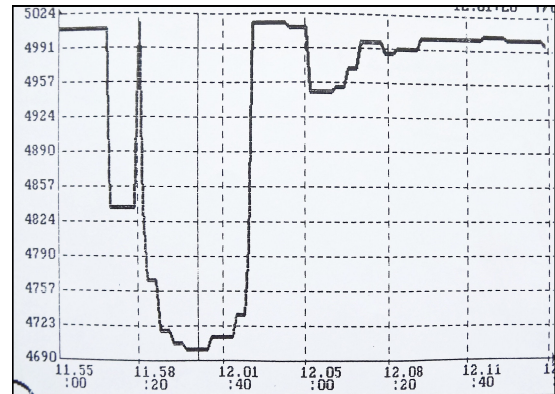


Рис. 6. Динаміка зміни частоти (Гц) ЕС-5 під час аварії

Зазначимо ще раз, що у відновленні балансу потужності в системі беруть участь системи (АЧР) і (АРШ). Перша здійснює примусове зниження навантаження, а друга – збільшення потужності генерації. Як зазначалося раніше, за паралельної роботи станцій їхнє фактичне навантаження, як правило, незбалансоване з потужністю генерації. Під час вимкнення ЛЕП-500 накид навантаження на окремі станції буде не однаковим. Ці два чинники призводять до того, що і гальмівні моменти на генераторах паралельно працюючих станцій будуть різними (на професійному жаргоні – вони отримають різні "поштовхи"). Неоднакові гальмівні моменти разом із різними інерційними характеристиками станцій створюють неоднакові зміни швидкості роторів генераторів і, відповідно, частот, що розрізняються, на різних станціях. Тоді і вступає в дію система АРШ з підвищення генерації потужності. Так можна пояснити зростання потужності генерації (рис. 5) і падіння частоти (рис. 6) на початковому етапі перехідного процесу.

Після розділення системи на несинхронні працюючі частини й вимкнення ЕС-4 перехідний аварійний процес фактично закінчився з край тяжкими наслідками. Далі починається робота з відновлення нормальної схеми системи ОЕ, яка проходить у такій послідовності:

- 1) о 12 год. 48 хв. за місцевим часом було подано напругу на шини ЕС-4 по лінії зв'язку із системою НЕ (див. рис. 1);
- 2) о 13 год. 36 хв. була ввімкнена ЛЕП-500 і почалося її завантаження;
- 3) о 13 год. 37 хв. була зроблена синхронізація ЕС-3 із системою;
- 4) о 16 год. 24 хв. була здійснена синхронізація ЕС-5 із системою;
- 5) о 17 год. 30 хв. був запущений у роботу блок № 5 на ЕС-5;
- 6) о 20 год. 40 хв. був запущений у роботу один із турбогенераторів ЕС-4;
- 7) о 22 год. 10 хв. були зняті всі обмеження за системою ОЕ.

Висновки

Проведений аналіз причин, ходу й наслідків аварії дозволяє зробити деякі висновки і припущення, які могли б допомогти уникнути або пом'якшити подібні явища надалі в системі ОЕ.

1. Необхідно збільшити власну встановлену генерувальну потужність.
2. Необхідно збільшити частку потужності, яка резервується для відпрацювання системи АЧР, порівняно із загальним об'ємом навантаження.
3. Корисно розглянути складніші алгоритми управління АЧР порівняно з наявним правилом роботи з відхилення частоти, наприклад, з відхилення небаланса потужності, її швидкості і навіть прискорення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / Веников В. А. – М. : Высшая школа, 1985. – 472 с.
2. Жданов П. С. Вопросы устойчивости электрических систем / Жданов П. С. – М. : Энергия, 1979. – 456 с.
3. Маркович И. М. Режимы энергетических систем / Маркович И. М. – М. : Энергия, 1969. – 394 с.

Терешкевич Леонід Борисович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електротехнічних систем електроспоживання і енергетичного менеджменту, тел. 46-53-57, lbter@meta.ua.

Милосердов Валерій Олександрович – кандидат економічних наук, доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання і енергетичного менеджменту, тел. 57-48-03, valeriy_miloserdov@mail.ru.

Вінницький національний технічний університет.