Національний авіаційний університет
Аерокосмічний факультет
Кафедра комп’ютеризованих електротехнічних систем та технологій

Перехідні процеси в системах електропостачання

Лекція 12

ПОЗДОВЖНЯ НЕСИМЕТРІЯ ТА СКЛАДНІ ВИДИ ПОШКОДЖЕНЬ

1. Загальні відомості

Кінцева мета аналізу порушень нормального режиму роботи у вигляді поздовжньої несиметрії та складних пошкоджень – розрахунок значень струмів і напруг у вітках, вузлах, заданих точках схеми СЕП та місці пошкодження. Цей розрахунок необхідний як обґрунтування вихідних даних для вибору електроустаткування СЕП, захисту її елементів, а також настроювання і аналізу роботи пристроїв системної автоматики.

Для формалізації аналізу поздовжню несиметрію уявляють як вмикання у кожну фазу трифазної мережі неоднакових опорів. При цьому враховують низку умов аналізу, розглядаючи лише основну гармоніку режиму:

- вмикання опору в фазу при незмінній е.р.с. джерела живлення рівнозначно шунтуванню таких же опорів в інших фазах;
- шунтування опору у фазі тотожно вмиканню за значенням такого ж опору, але з протилежним знаком;
- розрив фази розглядається як вмикання джерела напруги, тотожного спаду напруги на кінцях розірваної фази.

Як і для поперечної несиметрії, при розрахунку поздовжньої несиметрії *L* ефективне застосування методу симетричних складових, відповідно до яких розрахункові співвідношення можна подати через симетричні складові струму і напруги особливої фази *A*:

$$\left.\begin{aligned}\Delta\dot{U}_{LA} &= \Delta\dot{U}_{LA1} + \Delta\dot{U}_{LA2} + \Delta\dot{U}_{LA0}\\ \Delta\dot{U}_{LB} &= a^2\Delta\dot{U}_{LA1} + a\Delta\dot{U}_{LA2} + \Delta\dot{U}_{LA0}\\ \Delta\dot{U}_{LC} &= a\Delta\dot{U}_{LA1} + a^2\Delta\dot{U}_{LA2} + \Delta\dot{U}_{LA0}\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

і

$$\left.\begin{aligned}\dot I_{LA} &= \dot I_{LA1} + \dot I_{LA2} + \dot I_{LA0}\\ \dot I_{LB} &= a^2\dot I_{LA1} + a\dot I_{LA2} + \dot I_{LA0}\\ \dot I_{LC} &= a\dot I_{LA1} + a^2\dot I_{LA2} + \dot I_{LA0}\end{aligned}\right\}, \quad (2)$$

де I_{LA},I_{LB},I_{LC} та ΔU_{LA},ΔU_{LB},ΔU_{LC} – струм і спад напруги для несиметричної системи величин фаз A, B, C ; I_{LA1},I_{LA2},I_{LA0} та ΔU_{LA1},ΔU_{LA2},ΔU_{LA0} – симетричні складові струму і спаду напруги прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Струм визначених послідовностей викликає спад напруги відповідних послідовностей. Цей взаємозв'язок описаний системою незалежних рівнянь:

$$\left.\begin{aligned}\Delta\dot U_{LA1} &= \dot E_{A\Sigma} - \underline{z}_{1рез}\dot I_{LA1}\\ \Delta\dot U_{LA2} &= -\underline{z}_{2рез}\dot I_{LA2}\\ \Delta\dot U_{LA0} &= -\underline{z}_{0рез}\dot I_{LA0}\end{aligned}\right\}, \quad (3)$$

де $E_{A\Sigma}$ – сумарна е.р.с. джерел живлення, що діє лише у схемі для прямої послідовності; $\underline{z}_{1рез}$,$\underline{z}_{2рез}$,$\underline{z}_{0рез}$ – результуючі опори окремих послідовностей відносно місця порушення симетрії.

Таким чином, при поздовжній несиметрії методика отримання розрахункових співвідношень базується на розв'язанні системи рівнянь (1)–(3) з урахуванням граничних умов, що характеризують несиметрію.

Реальна схема електричної мережі з одноразовою поздовжньою несиметрією (розрив однієї або двох фаз, вмикання неоднакових опорів) зводиться до схем заміщення без розриву. Це досягається введенням у місце пошкодження джерела поздовжньої напруги із значенням, що дорівнює спаду напруги у місці поздовжньої несиметрії. Отримана схема заміщення придатна для аналізу з використанням аналітичних методів теорії електричних кіл.

Для відокремленої особливої фази, як і у разі поперечної несиметрії, складають схеми заміщення для окремих послідовностей. На основі їх аналізу знаходять розрахункові співвідношення та синтезують комплексну схему заміщення конкретного виду поздовжньої несиметрії. За комплексною схемою заміщення особливої фази визначають струми і напруги у будь-якій точці електричної мережі.

В електричній мережі іноді одночасно виникають поперечна та поздовжня несиметрії різних комбінацій, які характеризуються як складні види пошкоджень. Причинами таких пошкоджень у СЕП можуть бути накладання аварійних режимів чи аварійного режиму з процесом його вимкнення. Наприклад, неодночасне вимкнення несиметричного КЗ вимикачами у мережі з двостороннім живленням, поява несиметричних КЗ у кількох точках електричної мережі, обрив фази із замиканням на землю одного з кінців обірваного провідника тощо.

За складних видів пошкоджень послідовність обчислювальних операцій повторюється для кожної точки порушення поздовжньої симетрії. З допомогою методу симетричних складових кожна така точка характеризується для особливої фази трьома симетричними складовими струму і такою ж кількістю симетричних складових напруги. Тому при дворазовій несиметрії необхідно визначати 12 невідомих симетричних складових, для знаходження яких записати стільки ж незалежних рівнянь. Виходячи з граничних умов, для кожного місця порушення симетрії трифазної мережі отримують по три рівняння зв’язку симетричних складових струму та напруги.

Одноразова поздовжня несиметрія у трифазній мережі може бути наслідком неодночасної пофазної комутації, розриву фаз, пофазної відмінності навантаження тощо. Так, поздовжня несиметрія виникає при неодночасному розмиканні контактів комутаційного апарату (неодночасно з’являється дуга між контактами фаз), згорянні запобіжника в одній або двох фазах, несинхронному вмиканні синхронних машин, аварійному вимкненні фаз ЛЕП.

2. Розрив однієї фази трифазної мережі

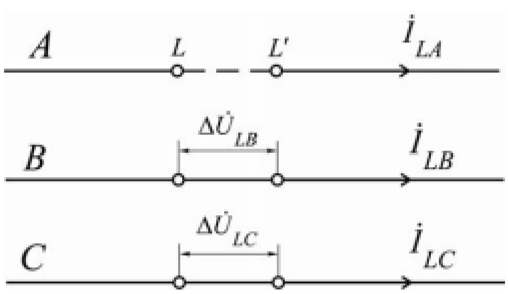

Рис. 1. Ділянка трифазної мережі з розривом фази *A* в місці *L* - *L’*

Під час розриву однієї фази трифазної мережі (рис.1) виникає несиметричний режим, який у місці пошкодження характеризується такими граничними умовами:

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_{LA} &= 0 \\ \Delta\dot{U}_{LB} &= 0 \\ \Delta\dot{U}_{LC} &= 0 \end{aligned}\right\}. \tag{4}$$

Для аналізу даного аварійного режиму у місце розриву фази вводять джерело поздовжньої напруги ΔU_{LA} (рис. 2,а) і для окремих послідовностей (рис. 2,б-г) складають схеми заміщення.

Порівнявши спад напруги для непошкоджених фаз, виражений симетричними складовими особливої фази A, маємо:

$$a^2\Delta\dot{U}_{LA1} + a\Delta\dot{U}_{LA2} + \Delta\dot{U}_{LA0} = a\Delta\dot{U}_{LA1} + a^2\Delta\dot{U}_{LA2} + \Delta\dot{U}_{LA0} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \Delta\dot{U}_{LA1} = \Delta\dot{U}_{LA2};$$
$$\Delta\dot{U}_{LB} = (a^2 + a)\Delta\dot{U}_{LA1} + \Delta\dot{U}_{LA0} = -\Delta\dot{U}_{LA1} + \Delta\dot{U}_{LA0} = 0 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \Delta\dot{U}_{LA1} = \Delta\dot{U}_{LA0}.$$

Таким чином, на основі симетричних складових струму і напруги особливої фази А граничні умови (4) запишемо:

$$\Delta\dot{U}_{LA1} = \Delta\dot{U}_{LA2} = \Delta\dot{U}_{LA0} = \Delta\dot{U}_{LA} / 3; \tag{5}$$

$$\dot{I}_{LA1} = -(\dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0}). \tag{6}$$

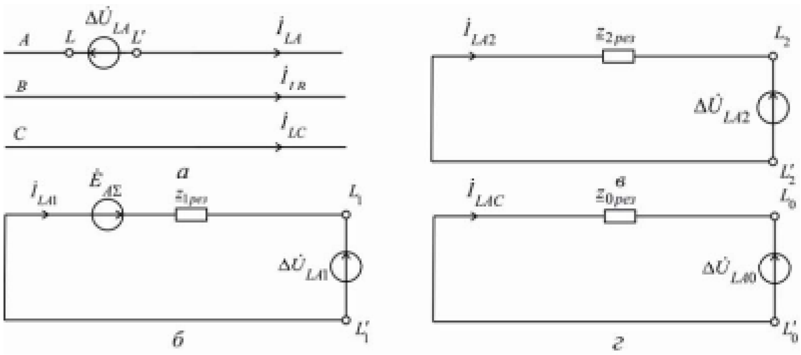

Рис. 2. Схеми для аналізу поздовжньої несиметрії при розриві фази А: а – розрахункова; б – заміщення прямої послідовності; в – заміщення зворотної послідовності; г – заміщення нульової послідовності

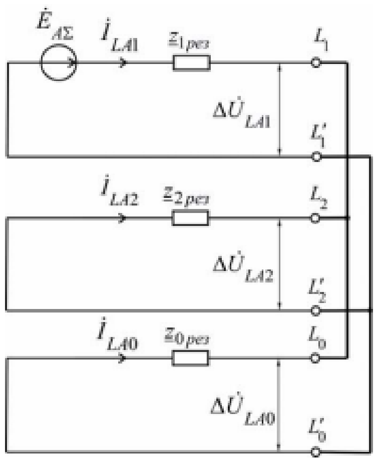

Рис. 3. Комплексна схема заміщення при розриві фази A

За останніми рівняннями можна синтезувати комплексну схему заміщення поздовжньої несиметрії (рис. 3), за якою складають розрахункові вирази для визначення струму прямої послідовності

$$\dot{I}_{LA1} = \dot{E}_{A\Sigma} / (\underline{z}_{1рез} + \underline{z}_{2рез}) \tag{7}$$

і спад напруги цієї послідовності у місці розриву

$$\Delta\dot{U}_{LA1} = \dot{I}_{LA1}\underline{z}_{LL1}. \tag{8}$$

Тут $\underline{z}_{LL1} = \underline{z}_{2рез}\ \underline{z}_{0рез} / (\underline{z}_{2рез} + \underline{z}_{0рез})$ – додатковий опір, що заноситься до комплексної схеми заміщення відносно затискачів L - L' схеми заміщення прямої послідовності вітками схем заміщення для зворотної та нульової послідовностей (рис. 3).

З урахуванням (5), а також другого і третього рівнянь (3) струми зворотної та нульової послідовностей, які перебігають вітками комплексної схеми заміщення (рис.3), визначають за виразами:

$$\dot{I}_{LA2} = -\dot{I}_{LA1}\underline{z}_{0рез} / (\underline{z}_{2рез} + \underline{z}_{0рез}) = -\dot{I}_{LA1}\underline{z}_{LL1} / \underline{z}_{2рез}; \tag{9}$$

$$\dot{I}_{LA0} = -\dot{I}_{LA1}\underline{z}_{2рез} / (\underline{z}_{2рез} + \underline{z}_{0рез}) = -\dot{I}_{LA1}\underline{z}_{LL1} / \underline{z}_{0рез}. \tag{10}$$

Струми зворотної та нульової послідовностей можна ще записати показниками комплексної схеми заміщення:

$$\dot{I}_{LA2} = -\dot{E}_{A\Sigma}\underline{z}_{LL1} / [\underline{z}_{2рез}(\underline{z}_{1рез} + \underline{z}_{LL1})]; \tag{11}$$

$$\dot{I}_{LA0} = -\dot{E}_{A\Sigma}\underline{z}_{LL1} / [\underline{z}_{0рез}(\underline{z}_{1рез} + \underline{z}_{LL1})]. \tag{12}$$

Відповідно до (3) та (5) для джерела поздовжньої напруги, ввімкненого у місці пошкодження, напруга

$$\Delta\dot{U}_{LA} = 3\dot{E}_{A\Sigma}\underline{z}_{LL1} / (\underline{z}_{1рез} + \underline{z}_{LL1}). \tag{13}$$

Отримані розрахункові співвідношення (5)–(13) являють собою рівняння зв’язку симетричних складових параметрів режиму особливої фази. Струми і напруги інших фаз визначають через оператор фази та рівняння (1) і (2). Значення напруги у будь-якій точці мережі встановлюють за розрахунковими виразами струмів (7), (11) і (12) із застосуванням перетворень комплексної схеми заміщення (рис. 3) відносно розглянутої точки мережі (для обчислення опору зв’язку даної точки з джерелом живлення).

3. Розрив двох фаз трифазної мережі

Розрив двох фаз трифазної мережі (рис. 4,а) характеризується у місці пошкодження такими граничними умовами:

$$\left.\begin{array}{l}\dot{I}_{LB} = 0\\ \dot{I}_{LC} = 0\\ \Delta\dot{U}_{LA} = 0\end{array}\right\}. \qquad (14)$$

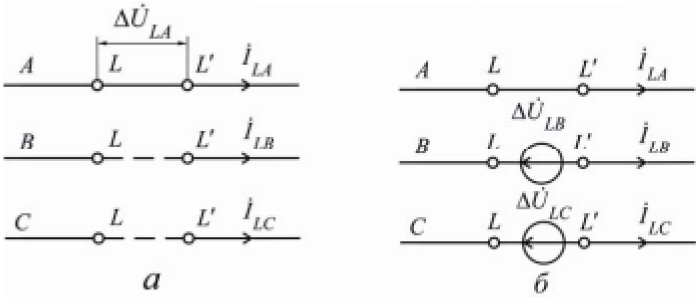

Рис. 4. Ділянка трифазної мережі з розривом фаз В і С (а) та її розрахункова схема (б)

За аналогією з розглянутим розривом однієї фази у місцях розриву фаз В і С вмикаємо джерела поздовжньої напруги ΔU_{LB} та ΔU_{LC} (рис. 4,б). Отримана подібним чином розрахункова схема дає змогу скласти комплексну схему заміщення (рис. 5). Взявши за особливу непошкоджену фазу *A* граничні умови (14), виражені через симетричні складові струму особливої фази, запишемо:

(15)

$$\dot{I}_{LB} = a^2\dot{I}_{LA1} + a\dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0};$$

(16)

Із різниці цих рівнянь $\dot{I}_{LC} = a\dot{I}_{LA1} + a^2\dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0}$.

$$\dot{I}_{LA1} = \dot{I}_{LA2}. \qquad (17)$$

Відповідно перетворивши рівняння (15), (16) з урахуванням тотожності (17), одержимо рівність

$$\dot{I}_{LA1} = \dot{I}_{LA2} = \dot{I}_{LA0} = \dot{I}_{LA} / 3. \qquad (18)$$

Після розкладання граничної умови $\Delta U_{LA} = 0$ на симетричні складові буде:

$$\Delta\dot{U}_{LA1} = -(\Delta\dot{U}_{LA2} + \Delta\dot{U}_{LA0}). \qquad (19)$$

Цей запис разом з рівністю (18) характеризує граничні умови даного виду пошкодження на основі симетричних складових напруги фази *A*.

Комплексна схема заміщення фази А, отримана з допомогою (18) і (19), зображена на рис. 5. За нею симетричні складові струму

$$\dot{I}_{LA1} = \dot{I}_{LA2} = \dot{I}_{LA0} = \qquad (20)$$
$$= \dot{E}_{A\Sigma} / (\underline{z}_{1\,рез} + \underline{z}_{2\,рез} + \underline{z}_{0\,рез}).$$

Спад напруги зворотної та нульової послідовностей знаходимо з рівняння (3), а напругу прямої послідовності – за виразом

$$\Delta \dot{U}_{LA1} = \dot{E}_{A\Sigma}(\underline{Z}_{2\,рез} + \underline{Z}_{0\,рез}) \,/\, (\underline{Z}_{1\,рез} + \underline{Z}_{2\,рез} + \underline{Z}_{0\,рез}). \qquad (21)$$

За симетричними складовими параметрів режиму фази А на основі рівнянь (1)–(3) можна розрахувати струми та напруги як у місці пошкодження, так і в будь-якій точці мережі. Тоді необхідно перетворити комплексну схему заміщення (рис.5) щодо аналізованої. На рис. 5 схема заміщення подана відносно місця пошкодження.