

Семестр 6 навчальна дисципліна «Електричні машини»
галузь знань 14 – «Електрична інженерія»
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Підготував: доц. Ярошенко Леонід Вікторович

Лекція № 4б

Тема: «Паралельна робота синхронних генераторів»

ПЛАН

- 1. Загальні відомості;*
- 2. Умови вмикання СГ на паралельну роботу;*
- 3 Регулювання активної потужності генератора, що працює паралельно з мережею, синхронізуюча потужність і синхронізуючий момент;*
- 4 Регулювання реактивної потужності паралельно працюючого синхронного генератора, U-подібні характеристики;*
- 5 Поняття про статичну і динамічну стійкість синхронного генератора при паралельній роботі;*

1 Загальні відомості

На сучасних електростанціях, як правило, встановлюють декілька синхронних генераторів, що підключені до загальної мережі, тобто працюють на загальне навантаження, або генератори включені на паралельну роботу.

Паралельна робота генераторів на електричних станціях має такі переваги:

1. оскільки, навантаження електростанції змінюється в пліні доби і року, то в періоди малих навантажень частина генераторів відключається, чим підвищується економічність роботи електростанції;

2. потужність сучасних електростанцій така, що виконати генератор на таку потужність є складною технічною задачею.

Якщо розглядати енергетичну систему країни, то в ній на загальне навантаження працює велика кількість електростанцій, а отже в цій системі на паралельну роботу включене велике число синхронних генераторів.

Це має також свої переваги:

1. з'являється резерв генераторів на випадок ремонту або аварій генераторів якої-небудь з електростанцій, оскільки навантаження розподіляється між іншими працюючими генераторами.

2. поліпшується економічність роботи гідравлічних станцій, енергія яких є дешевою, оскільки в періоди малих навантажень в першу чергу розвантажуються теплові електростанції.

2 Умови вмикання СГ на паралельну роботу

Увімкнути генератор в мережу з паралельно працюючими генераторами можна способом точної синхронізації або способом самосинхронізації.

Метод точної синхронізації. При вмиканні синхронного генератора, на паралельну роботу методом точної синхронізації спочатку вмикається його приводний двигун, потім подається збудження і після цього виконується синхронізація генератора з мережею.

У процесі синхронізації необхідно в момент вмикання генератора в мережу виконати такі умови:

1. напруга на затискачах обмотки якоря генератора, що вмикається, повинна бути рівною напрузі *мережі* ($U_g = U_M$);

2. частота напруги генератора, що вмикається, повинна дорівнювати частоті напруги *мережі* ($f_g = f_M$);

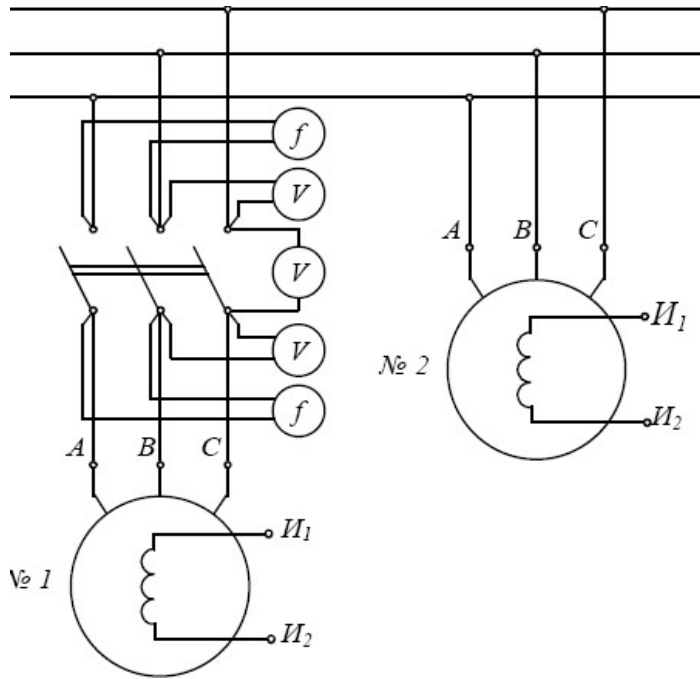
3. полярність затискачів обмотки якоря повинна відповідати полярності затискачів мережі;

4. порядок чергування фаз генератора і мережі повинні бути однаковими.

Розглянемо вмикання синхронного генератора на паралельну роботу **методом точної синхронізації**. Для цього скористаємося принциповою схемою представленою на мал. 17.1.

Вмикання генератора *I* на паралельну роботу з мережею починається з пуску його приводного двигуна. Після цього виконується синхронізація СГ з мережею.

Перша умова, тобто рівність напруг генератора і мережі забезпечується регулюванням струму збудження генератора. Контролюється виконання цієї умови вольтметрами, один із яких ввімкнений в коло генератора, інший до мережі.



Вмикання синхронного генератора

на паралельну роботу

Друга умова, тобто рівність частот генератора і мережі, забезпечується регулюванням частоти обертання приводного двигуна. При цьому необхідно врахувати, що зі зміною частоти обертання приводного двигуна, змінюється вихідна напруга генератора. Отже, потрібно відповідне регулювання струму збудження генератора, щоб забезпечити виконання першої умови. Рівність частот контролюється частотомірами, підключеними відповідно до генератора і мережі.

Третя умова, тобто відповідність полярності затискачів обмотки якоря генератора полярності мережі контролюється так називаним нульовим вольтметром, ввімкненим у розтин якої-небудь фази між генератором і мережею.

Четверта умова, тобто порядок чергування фаз генератора і мережі може бути проконтрольовано різними способами, наприклад, за допомогою фазопоказчика. Однак, ця і попередня умови, як правило, контролюються синхроскопом.

Найпростіший синхроскоп виконується на лампах розжарювання за двома схемами (мал. 17.2).

В схемі на "потухання" мал. 17.2, а в процесі синхронізації генератора з мережею спостерігається одночасні миготіння всіх лампочок.

Чим ближче частота генератора f_g до частоти мережі f_m , тим рідше миготіння лампочок синхроскопа. Коли настає момент, сприятливий для вмикання генератора в мережу, усі лампи цього синхроскопа погашені.

В схемі «на обертання вогню» (мал. 17.2, б) в процесі синхронізації з мережею спостерігається ефект обертового вогню.

Коли настає момент, сприятливий для вмикання генератора в мережу, ефект обертового вогню в цьому синхроскопі припиняється.

4-та умова, тобто відповідність порядку чергування фаз генератора і мережі може бути проконтрольовано, якщо синхроскоп зібраний за схемою рис. 17.2, а.

У тому випадку, коли в схемі спостерігається ефект обертання вогню, то порядок чергування фаз генератора і мережі не однаковий.

Перераховані вище прилади, що контролюють процес синхронізації і синхроскоп, входять до складу синхронізуючої колонки генератора.

Розглянемо, що відбудеться, якщо ввімкнути на паралельну роботу генератор в якого (інші умови паралельної роботи виконані):

➤ напруги $U_g \neq U_m$ - з'явиться реактивний вирівнювальний струм, що вирівнює напругу генератора і мережі. Він перевантажує обмотки генераторів, що не дає можливості використовувати їх на повну потужність і створює додаткові втрати на нагрівання обмоток статора;

➤ напруги генераторів і мережі зсунуті по фазі на кут менший 180° - з'явиться вирівнювальний струм з великою активною складовою, який створює механічний поштовх на роторі генератора в напрямку, зворотному напрямку обертання генератора і кут між U_g і U_m встановиться 180° ;

➤ частоти СГ і мережі не рівні ($f_g \neq f_m$) - з'явиться вирівнювальний струм, який різко змінюється по амплітуді, тому що ΔU коливається від 0 до $2U_\phi$.

➤ різний порядок чергування фаз - у двох фазах з'явиться великий вирівнювальний струм.

Метод самосинхронізації. Описаний вище спосіб вмикання в мережу синхронних генераторів відносно складний, вимагає великої точності і є дуже відповідальним. Тому останнім часом в наших енергосистемах впроваджується вмикання синхронних генераторів в мережу по методу *самосинхронізації* (грубої синхронізації). Сутність методу полягає в наступному: генератор приводиться в обертання первинним двигуном з частотою, що може відрізнятися від синхронної на $\pm(2+5\%)$, і вмикається в мережу без збудження, причому обмотка ротора, щоб уникнути перенапруги в момент вмикання, замикається на деякий опір; після цього, як правило, зараз же після вмикання генератора в мережу, подається збудження, і генератор входить в синхронізм.

Таким чином, при вмиканні генератора по методу самосинхронізації різниця ЕРС дорівнює напрузі мережі ($\Delta e = U_m - U_c = U_m$), а ротор генератора обертається з частотою, яка трохи відрізняється від синхронної частоти, з якою обертається магнітне поле статора. У цих умовах в статорі спостерігається кидок струму, що у кілька разів перевищує номінальний струм, а на валу генератора виникають механічні зусилля, але останні невеликі і, як показує досвід, не становлять для машини ніякої небезпеки.

Дослідження, зроблені в ряді наших енергосистем по вмиканню турбо- і гідро-генераторів потужністю від 1 до 55 тис. кВА методом самосинхронізації показали, що вмикання по цьому методу протікає успішно як у випадку турбо- так і гідрогенераторів і може застосовуватися і для синхронних компенсаторів. Час, за який струм статора знижується до свого номінального значення, коливається в межах 1-7 сек.

Вмикання по методу самосинхронізації надзвичайно спрощує процес вмикання, вимагає дуже мало часу і може бути легко автоматизовано; воно має особливо велике значення при ліквідації аварій, коли з одного боку, генератор потрібно швидко ввімкнути в мережу і коли, з іншого боку, при значних коливаннях напруги і частоти робота описаних вище синхронізуючих пристроїв затрудняється, а іноді стає неможливою.

3 Регулювання активної потужності генератора, що працює паралельно з мережею, синхронізуюча потужність і синхронізуючий момент

У тому випадку, коли генератор увімкнений на паралельну роботу з мережею і працює в усталеному режимі, момент M_I , що розвивається приводним двигуном, врівноважується гальмівним електромагнітним моментом і моментом холостого ходу:

$$M_I = M_{em} + M_0.$$

Якщо знехтувати втратами в статорі, то, як впливає з енергетичної діаграми (мал. 16.11)

$$P_2 = P_{em} \text{ або } P_2 = P_{em} = M_{em}\omega \approx M_I\omega_I$$

де $\omega = \omega_I$ - кутова швидкість ротора і, відповідно, кутова швидкість поля статора.

З приведеного виразу очевидно, що активна потужність, яка віддається генератором в мережу P_2 , залежить від величини моменту на валу приводного двигуна M_I .

У такий спосіб при збільшенні моменту на валу генератора, він навантажується.

Якщо генератор працює на мережу нескінченної потужності, тобто:

$$U = const, f = const, P_2 = P_{em} = f(\theta),$$

де θ - кут неузгодженості, кут на який вісь ротора зміщена відносно осі результуючого магнітного поля СМ.

Отже, при зміні моменту на валу синхронного генератора відбувається зміна кута неузгодженості θ . Звідси виникає необхідність дослідити стійкість роботи синхронного генератора при зміні моменту на його валу. Для цього скористаємося кутовою характеристикою синхронного генератора (мал. 17.3).

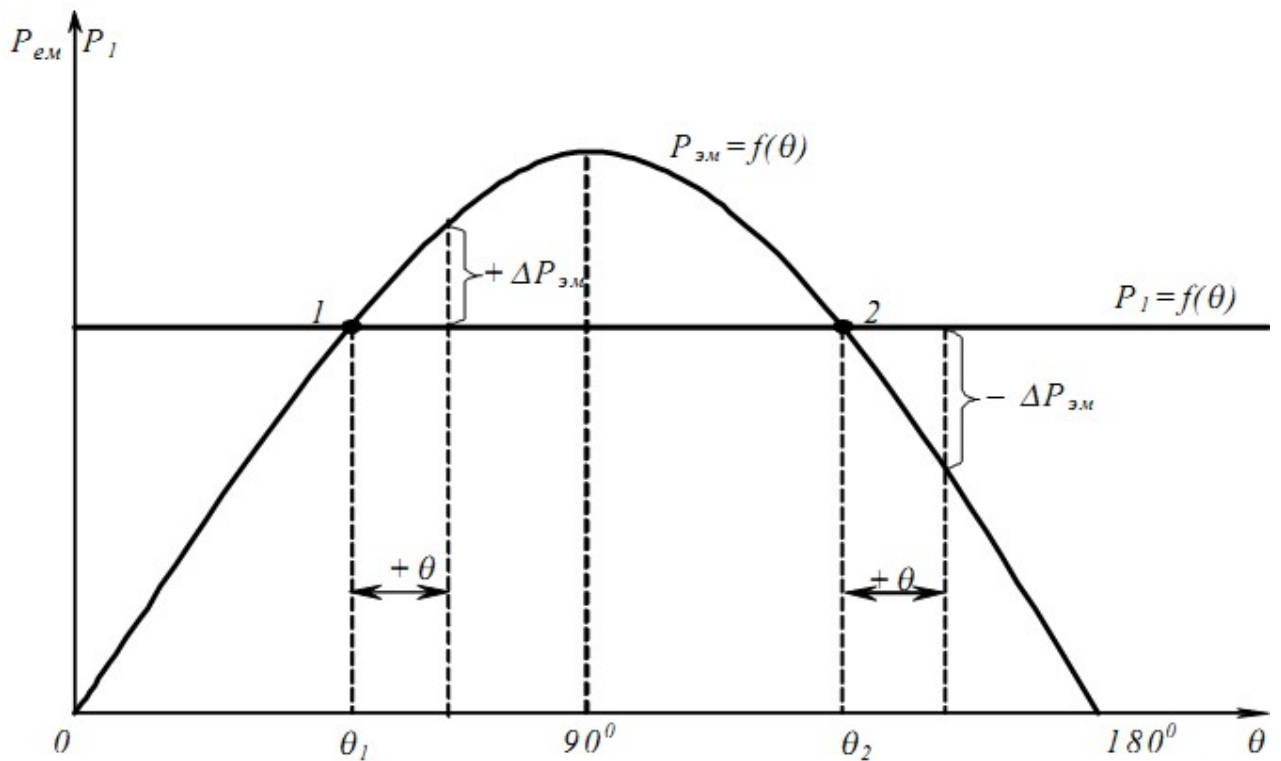
Вважаємо, що потужність приводного двигуна не залежить від кута θ (див. характеристику $P_I = f(\theta)$ мал. 17.3).

Як відзначалося, в усталеному режимі роботи генератора M_I урівноважений M_{em} , тобто має місце баланс потужностей $P_I = P_{em}$.

На приведених характеристиках (мал. 17.3) цій умові відповідають точки 1 і 2, тобто точки перетину характеристик $P_{em} = f(\theta)$ і $P_I = f(\theta)$.

Дослідимо усталений режим роботи синхронного генератора в точках 1 і 2, тобто при роботі генератора з кутами неузгодженості θ_1 і θ_2 .

Нехай при роботі генератора в точці 1 відбулася зміна моменту на валу приводного двигуна, що викликало збільшення кута θ на величину $+\Delta\theta$. Цьому збільшенню кута неузгодженості відповідає збільшення електромагнітної потужності $+\Delta P_{ем}$. Якщо зникає фактор, що викликав зміну моменту на валу приводного двигуна синхронного генератора, то в перший момент часу генератор віддає в мережу потужність більшу, ніж він одержує від приводного двигуна. Тому генератор повертається у вихідну точку 1 з кутом θ_1 .



Мал. 17.3 Кутова характеристика синхронного генератора

Таким чином, режим роботи синхронного генератора в точці 1 є **стійким режимом** роботи.

При роботі генератора в точці 2 позитивному збільшенню $+\Delta\theta$ відповідає негативне збільшення електромагнітної потужності $-\Delta P_{ем}$. Це означає, що при збільшенні кута θ приводний двигун буде прискорювати генератор і він, у кінцевому рахунку, випаде із синхронізму.

Таким чином, режим роботи синхронного генератора в точці 2 є **нестійким режимом роботи**.

Критерій усталеної роботи синхронного генератора при зміні моменту на валу можна записати:

$$\frac{\Delta P_{em}}{\Delta \theta} > 0 \quad \text{або} \quad \frac{dP_{em}}{d\theta} > 0 \quad (17.1)$$

Цій умові відповідає висхідна гілка кутової характеристики (мал. 17.3) $0 < \theta < 90^\circ$

Кут $\theta = 90^\circ$ при значенні $P_{em} = P_{em.max}$, відповідає межі усталеної роботи генератора (у явнополюсних генераторів $P_{em.max}$ при $\theta < 90^\circ$).

Відношення $K_p = P_{em.max}/P_n$ - перевантажувальна здатність синхронного генератора.

У турбогенераторів $K_p \approx 2$, у гідрогенераторів $K_p > 2$.

Повернення синхронного генератора у вихідний стан, коли зникає фактор, що викликав зміну моменту на його валу відбувається за рахунок $+\Delta P_{em}$, що називається синхронізуючою потужністю генератора.

Ця потужність тим більша, чим більше $P_{сн} = dP_{em}/d\theta$ - коефіцієнт синхронізуючої потужності.

Синхронізуючій потужності генератора відповідає синхронізуючий момент:

$$\Delta M_{em} = \Delta P_{em}/\omega_1 \quad (17.2)$$

Таким чином, умовою усталеної роботи синхронного генератора є

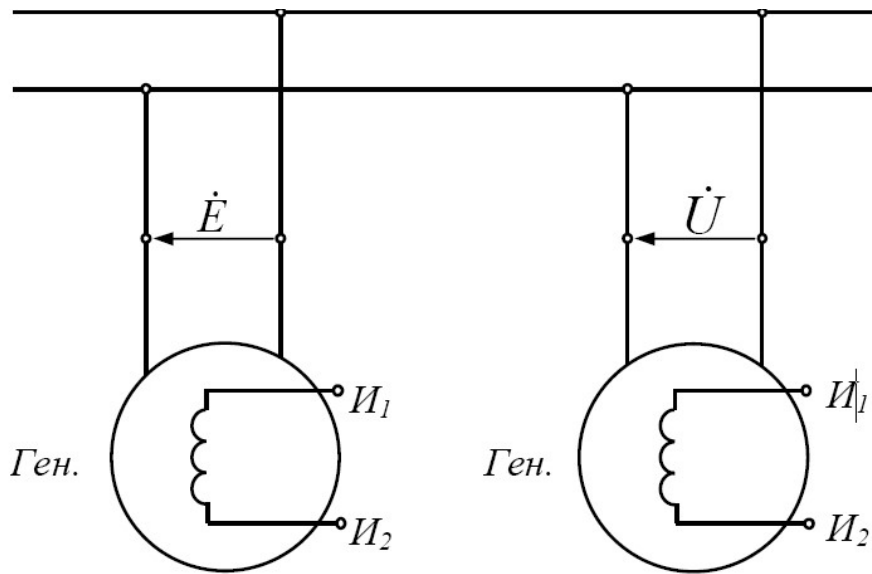
$$\Delta P_{em} > 0; \Delta M_{em} > 0. \quad (17.3)$$

4 Регулювання реактивної потужності паралельно працюючого синхронного генератора, U-подібні характеристики

Нехай у генератора, що працює на мережу нескінченної потужності, момент на валу залишається незмінним, але при цьому регулюється струм збудження

$$M_I = const, \quad I_{зб} = var.$$

Досліджуючи цей режим, скористаємося принциповою схемою двох паралельно ввімкнених однофазних синхронних генераторів (мал. 17.4).



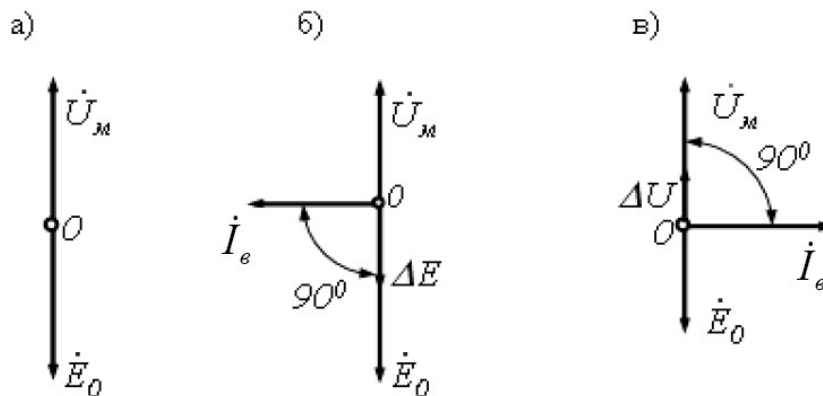
Схеми вмикання

однофазних синхронних генераторів в мережу

Оскільки в будь-який момент часу полярність затискачів обмоток якорів генераторів 1 і 2 відповідає полярності мережі, то в будь-який момент часу вектори напруг цих генераторів (E для генератора 1 і U для генератора 2) мають однаковий напрямок стосовно початків і кінців затискачів обмоток якорів.

У той же час, якщо розглянути замкнутий контур, утворений обмоткою якоря генератора 1, з'єднаного шинами з обмоткою якоря генератора 2, то в цьому замкнутому контурі вектори E і U знаходяться в протифазі.

Нехай генератор 1 є регульованим генератором у відношенні його струму збудження. Орієнтуємо його збудження таким чином, щоб величина його напруги E дорівнювала величині U (мал. 17.5, а)



Мал. 17.5 Діаграми ЕРС при паралельній роботі генераторів з мережею у випадку: а)

$$E_0 = U_m; \text{ б) } E_0 > U_m \text{ і в) } E_0 < U_m$$

У цьому випадку різниця потенціалів ΔE між однойменними затискачами генераторів дорівнює нулю, і, якщо генератори працюють в режимі холостого ходу, то струм між ними не протікає, тобто $\Delta E = 0, I_g = 0$. Цей випадок відповідає нормальному збудженню регульованого генератора:

$$I_{зб} = I_{зб.норм}$$

Збільшимо струм збудження регульованого генератора проти його нормального значення, тобто перезбудимо генератор

$$I_{зб} > I_{зб.норм}$$

В цьому випадку ЕРС обмотки якоря регульованого генератора E стане більшою U_m і між однойменними затискачами паралельно ввімкнених генераторів з'явиться різниця потенціалів ΔE (мал. 17.5, б).

Під дією різниці потенціалів ΔE , між паралельно ввімкненими генераторами потече вирівнювальний струм I_g . Контур, по якому тече цей струм, включає обмотки якорів генераторів і сполучні шини. Цей контур має переважно індуктивний опір (активний опір значно менший). Тому вирівнювальний струм I_g відстає від ΔE практично на 90° .

З аналізу векторної діаграми (мал. 17.5, б) приходимо до наступного висновку:

1. вирівнювальний струм I_g є чисто реактивним струмом стосовно \dot{E} і \dot{U} . Цей струм робить перерозподіл реактивної потужності між регульованим генератором і мережею.
2. оскільки струм I_g відстає від \dot{E} на 90° , то в генераторі 1, тобто в регульованому генераторі, він створює поздовжньо-розмагнічуючу реакцію якоря, а в генераторі 2 він створює поздовжньо-намагнічуючу реакцію якоря.

За рахунок зазначеної дії поздовжньої реакції якоря в генераторах їхня вихідна напруга U вирівнюється до загальної напруги мережі.

У тому випадку, коли струм збудження регульованого генератора, установлений менше нормального значення, він працює в режимі недозбудження:

$$I_{зб} < I_{зб.норм}$$

У цьому випадку, між однойменними затискачами паралельно ввімкнених генераторів, також діє різниця потенціалів ΔE (мал. 17.5, в).

Як і в попередньому випадку вирівнювальний струм \dot{I}_e відстає від $\Delta\dot{E}$ на 90° . Для генераторів 1 і 2 він є також чисто реактивним. Він не робить перерозподіл активної потужності між генераторами 1 і 2, а робить перерозподіл реактивної потужності.

В режимі недозбудження, як видно з векторної діаграми, струм \dot{I}_e випереджає \dot{E} на 90° . У генераторі 1 він створює поздовжньо-намагнічуючу реакцію якоря.

В той же час струм \dot{I}_e відстає від напруги \dot{U} на 90° . В генераторі 2 він створює поздовжньо-розмагнічуючу реакцію якоря.

Таким чином, і в цьому випадку напруга паралельно працюючих генераторів вирівнюється до загальної напруги мережі U_m .

Оцінімо величину вирівнювального струму паралельно ввімкненого синхронного генератора в режимі недозбудження і перезбудження.

Так як, вирівнювальний струм I_e є чисто реактивним струмом для паралельно ввімкнених генераторів і створює поздовжню реакцію якоря, то він визначається за виразом:

$$i = -j \frac{\Delta\dot{E}}{x_d} = -j \frac{\dot{U} + \dot{E}}{x_d} \quad (17.4)$$

Проаналізуємо цей вираз для різних випадків збудження регульованого паралельно ввімкненого генератора і знайдемо первісну залежність $I_e = f(E)$.

1) В режимі нормального збудження $I_{зб} = I_{зб.норм}$ величини E і U однакові, і оскільки вектори цих напруг знаходяться в протифазі, то

$$\Delta E = 0 \text{ і } I_e = 0.$$

Це визначає положення точки A на осі абсцис (мал. 17.6).

Відповідно до приведеної залежності вирівнювальний струм I_e змінюється лінійно при зміні E .

В остаточному підсумку, послабляючи (зменшуючи) збудження регульованого генератора, можемо одержати $I_{зб} = 0 \rightarrow E = 0$, тому величина вирівнювального струму буде визначатися виразом:

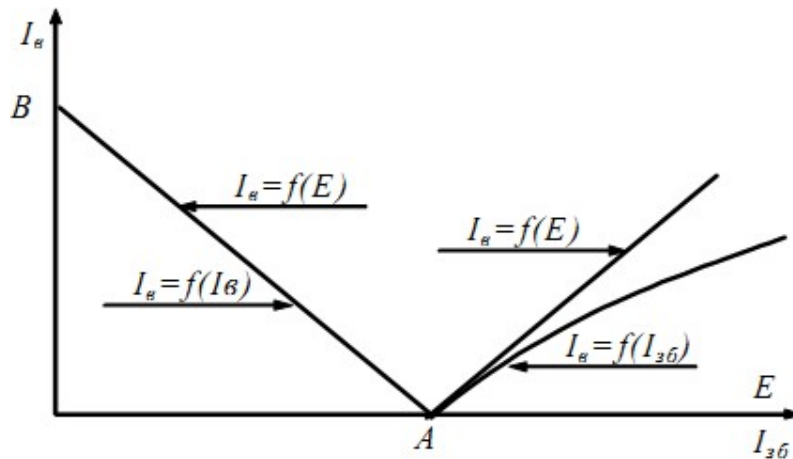
$$I_e = U/x_d.$$

Ця залежність вирівнювального струму визначає положення точки B на осі ординат.

2) в режимі перезбудження $I_{зб} > I_{зб.норм}$

$$E > U \rightarrow \Delta E > 0 \rightarrow I_e > 0.$$

У цьому випадку вирівнювальний струм I_e також лінійно змінюється при зміні величини E .



Мал. 17.6 Залежності $I_e = f(E)$ і $I_e = f(I_{зб})$

Перейдемо від залежності $I_e = f(E)$ до залежності $I_e = f(I_{зб})$.

В режимі недозбудження магнітне коло регульованого генератора залишається ненасиченим, тому $E \sim I_{зб}$ (пропорційно).

Тому в режимі недозбудження залежність $I_e = f(E)$ у визначеному масштабі може бути представлена як залежність $I_e = f(I_{зб})$.

У режимі перезбудження зі збільшенням струму $I_{зб}$ магнітне коло регульованого генератора насичується, тому E не пропорційна $I_{зб}$.

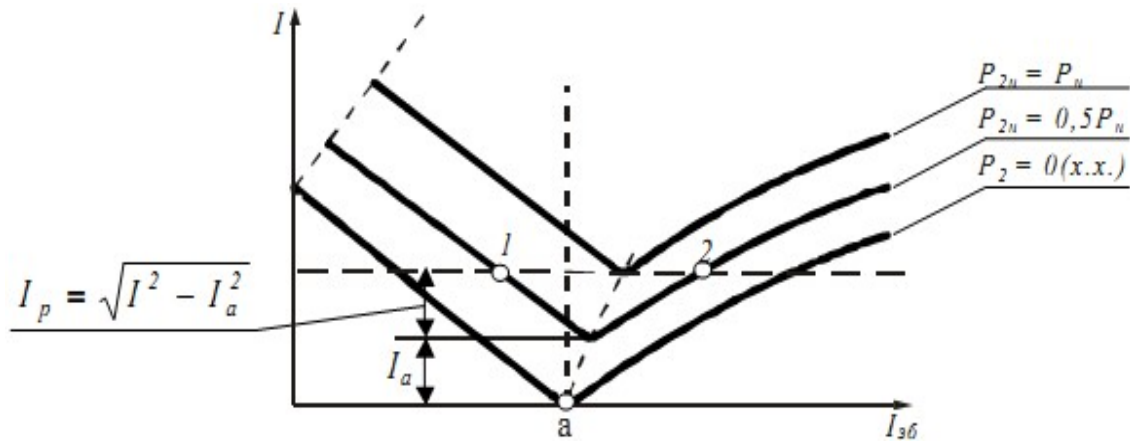
З цієї причини крива $I_e = f(I_{зб})$ проходить нижче $I_e = f(E)$.

Розглядаючи регулювання струму збудження $I_{зб}$, паралельно ввімкненого генератора, враховували тільки вирівнювальний струм $I_{зр}$. Це означає, що розглядався режим холостого ходу паралельно включеного генератора.

Отримана залежність $I_e = f(I_{зб})$ називається U-подібною характеристикою режиму холостого ходу паралельно ввімкненого синхронного генератора.

Аналогічні залежності $I_e = f(I_{зб})$ можна одержати й в режимі навантаження паралельно ввімкненого синхронного генератора.

В навантажувальному режимі крива $I_e = f(I_{зб})$ проходить вище аналогічної характеристики режиму холостого ходу, тому що в навантажувальному режимі струм обмотки якоря I регульованого генератора складається з активної і реактивної складових (мал. 17.7).



Мал. 17.7 U-подібні криві синхронного генератора

З точки “а” нагору проведена пунктирна лінія, що відповідає такому значенню струму збудження $I_{зб.норм}$ при якому струм статора стає мінімальним і рівним тільки активній складовій. У цьому випадку генератор працює при коефіцієнті потужності $\cos\varphi = 1$. Відхилення цієї пунктирної лінії праворуч вказує на те, що зі зростанням навантаження струм збудження необхідно збільшувати, для підтримки напруги на затискачах генератора незмінною.

Якщо розглянути якесь значення струму обмотки якоря паралельно ввімкненого генератора, зумовленого точками 1 і 2 U-подібної характеристики, то необхідно відзначити, що в цих точках реактивна складова є відстаючою стосовно напруги мережі для точки 1 і випереджальною стосовно напруги мережі для точки 2. Це впливає з аналізу кривих, приведеніх вище.

В навантажувальному режимі при нормальному збудженні струм обмотки якоря генератора є чисто активним.

5 Поняття про статичну і динамічну стійкість синхронного генератора при паралельній роботі

Коефіцієнт перевантажувальної здатності:

$$K_p = P_{em.max}/P_n \quad (17.6)$$

характеризує **статичну стійкість** паралельно працюючого синхронного генератора, тобто його здатність не випадати із синхронізму при повільній зміні навантаження.

Від статичної стійкості, необхідно відрізнити **динамічну стійкість**, тобто здатність генератора не випадати із синхронізму при різкій зміні навантаження.

В умовах експлуатації синхронних генераторів можливі короткі замикання в мережі, зв'язаної з генератором. При цьому напруга мережі різко знижується. Як впливає з рівняння:

$$P_{эм} = \frac{mUE_0}{x_d} \sin\theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

При різкому зниженні вихідної напруги синхронного генератора U , знижується електромагнітна потужність генератора і з'являється небезпека випадання його із синхронізму. Щоб запобігти цьому, генератор забезпечується системою швидковідгукового збудження. В цій системі, при зниженні напруги U , автоматично різко збільшується струм збудження генератора. При цьому ЕРС обмотки якоря E_0 збільшується і за рахунок цього електромагнітна потужність P_{em} утримується в необхідних межах.

Таким чином, динамічна стійкість паралельно працюючого синхронного генератора, забезпечується системою швидковідгукового збудження (форсуванням збудження).

Контрольні питання

1. Що таке синхронізація генератора, що вмикається па паралельну роботу?
2. Як навантажити генератор, ввімкнений на паралельну роботу?
3. Що таке синхронізуюча потужність і синхронізуючий момент?

4. Що таке навантажувальна здатність синхронного генератора?
5. Що є умовою усталеної роботи синхронного генератора?
6. Що являють собою U-подібні характеристики синхронного генератора?
7. Що таке статична і динамічна стійкість синхронного генератора при паралельній роботі?

Література:

1. Грабко В.В., Розводюк М.П., Левицький С.М., Казак М.О. Г75 Експериментальні дослідження електричних машин. Частина IV. Синхронні машини. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 197 с.
2. Електричні машини. Навчальний посібник / Г.Г. Півняк, Ф.П. Шкрабець, В.П. Довгань. – Дніпропетровськ: Видавництво Національного гірничого університету, 2003, - 328 с.