

11. Буткевич Г.Р. «Современное состояние горной отрасли промышленности строительных материалов США» «Строительные материалы», 2003. - № 4. - С. 31-33.

12. Барина Я.С. «Современное состояние и проблемы горной промышленности строительных материалов». Материалы X Международной конференции «Технология, оборудование и сырьевая база горных предприятий промышленности строительных материалов». Минск, 2002. - С. 27-32.

13. Данилишин Б.М., Дорогунцев С.І., Міщенко В.С. та ін. Природно-ресурсний потенціал сталого розвитку України. – Київ, 1999. – 350 с.

14. Муйземнек Ю.Ф. Конусные дробилки. - М.: из-во Машиностроение, 1970,-196с.

15. Юмашев В.М., Панфилов Ф.В. Технология и оборудование для производства щебня узких фракций кубовидной формы. «Строительная техника и технология», №4, 2002, с.76-79.

Рукопись поступила в редакцию 02.04.18

УДК 621.313.

І.І. ПЕРЕСУНЬКО, асистент, Д.С. КРАВЧЕНКО, А.С. БРАСЛАВСЬКИЙ,
Ю.В. ШЕРСТНЬОВ, студенти
Криворізький національний університет

ВПЛИВ ЗМІН НАПРУГИ І ЧАСТОТИ МЕРЕЖІ ЖИВЛЕННЯ НА РОБОТУ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Мета. Є дослідження впливу зміни напруги і частоти мережі живлення на роботу синхронних двигунів, і виявлення аварійного режиму щоб в подальшому модернізувати електромеханічну систему та забезпечити стійку роботу обладнання з СД.

Методи дослідження. При проведенні розглянутого в статті дослідження вирішуються шляхом застосування, як математичного апарату були використані методи теорії стійкості і теорії електроприводу.

Наукова новизна. Розглянуто математичну модель аварійних режимів синхронного електроприводу, при коротких замиканнях в різних точках електричної мережі і втрати живлення внаслідок відключення від електричної мережі.

Практична значимість. Проведено аналіз впливу зміни напруги і частоти мережі живлення, на автоматизацію високовольтних синхронних електроприводів, і оптимізація режимів їх роботи та способів оцінки запасу стійкості в різних режимах.

Результати. Великі синхронні двигуни (далі СД) знаходять в даний час широке застосування в системах електроприводу насосних, компресорних і вентиляційних установок. Такі двигуни мають істотні переваги більш високим ККД у порівнянні з асинхронними машинами такої ж потужності, меншою залежністю крутного моменту від напруги, що підводиться, незалежністю частоти обертання від навантаження на валу електродвигуна, можливістю використання двигуна для компенсації реактивної потужності. Разом з тим, експлуатація синхронних двигунів супроводжується певними особливостями, пов'язаними з можливістю переходу машини в генераторний або асинхронний (щодо напруги живлення) режими роботи внаслідок короточасного зниження або відсутності напруги або втрати збудження. У той же час, як правило великі синхронні машини є споживачами першої категорії, незаплановане відключення яких може призвести до суттєвих матеріальних втрат, ризику для здоров'я і життя людей. Перераховані вище обставини призводять до необхідності комплексного підходу до заходів, спрямованих на збереження стійкості роботи синхронних машин в різних режимах.

Ключові слова: аварій, електромеханічних систем, мережі живлення, синхронний електропривод, втрати живлення.

doi: 10.31721/2306-5435-2018-1-103-177-181

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Синхронні двигуни знаходять дуже обмежене застосування на початку 20-го століття не дивлячись на їх очевидну перевагу - можливість роботи з видачею реактивної потужності. [7] Пов'язано це було з складністю пуску таких машин - розворот до підсинхронних частоти обертання здійснювався або допоміжним двигуном, або пусковою обмоткою, конструкція якої в той час була погано оптимізована. Пропонувалися також більш екзотичні варіанти машин, наприклад, «Ультрасинхронний двигун» статор якого при пуску приводився в рух таким чином, щоб його частота обертання щодо ротора завжди була синхронною [8].

За останні роки виконано велику кількість досліджень в напрямку контролю і підвищення стійкості роботи синхронних двигунів при короточасній втраті харчування, це показує, що тема є актуальною і розробляється багатьма науково-дослідними колективами.

Аналіз досліджень і публікацій. В даний час багато дослідників і наукові колективи займаються дослідженнями, пов'язаними з підтриманням стійкості роботи великих синхронних машин. Роботи в цій галузі в даний час ведуться такими вітчизняними та зарубіжними дослідниками, як Б.М. Абрамович, Д.А. Устинов, Ю.А. Сичов, І.Г. Плотніков, Б.Ю. Васильєв, А.С. Гусєв, С.В. Свічкарьов, В.А. Савицький, Marius Babescu, Octavian Prostean, Gabriela Prostean, Iosif Szeidert, Cristian Vasar, Kai Pietiläinen, Magnus Jansson, Lennart Harnefors.

Постановка задачі. Аналіз досліджень, проведених з питань автоматизації високовольтних синхронних електроприводів, оптимізації режимів їх роботи та способів оцінки запасу стійкості в різних режимах.

Викладення матеріалу та результати. Аналіз впливу змін напруги і частоти мережі живлення на роботу синхронних двигунів наведено в джерелах [1]-[3], [5], [6]. Оскільки в рамках даної роботи розглядаються тільки неявнополюсного СД, всі формули наведені з розрахунку $x_d = x_q$.

Слід розділити режими втрати харчування СД:

викликані відключенням лінії 110 (220) кВ;

викликані коротким замиканням в мережі 110 (220) кВ або 6 (10) кВ.

У другому випадку виникає підживлення від двигуна місця короткого замикання, в цьому випадку гальмування двигунів відбувається швидше, швидше знижується частота і амплітуда напруги на секції, від якої живляться СД. Розглянемо далі поведінку синхронного двигуна при близькому короткому замиканні. Схема заміщення для такого випадку приведена на рис. 1.

При короткому замиканні на приєднання, що живиться від шин, до яких підключені синхронні двигуни, в перший момент часу ($t = 0$), струм в місці короткого замикання буде дорівнює сумі струмів джерела живлення і синхронних двигунів. Запишемо для схеми заміщення, наведеної на малюнку для $t = 0$

$$x_{c.к.з} = x_c + x'_{к.з} + x_c \cdot x'_{к.з} / x_{\deltaв}; \quad (1)$$

$$x_{\deltaв.к.з} = x_{\deltaв} + x'_{к.з} + x_{\deltaв} \cdot x'_{к.з} / x_c, \quad (2)$$

де $x_{c.к.з}$ - індуктивний опір між живлячим джерелом мережі і місцем КЗ; $x_{\deltaв.к.з}$ - індуктивний опір між двигуном і місцем КЗ; x_c - індуктивний опір мережі; $x_{к.з}$ - перехідний індуктивний опір від шин підстанції до місця КЗ; $x_{\deltaв}$ - індуктивний опір двигуна.

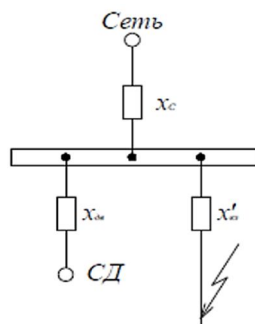


Рис 1. Схема заміщення для розрахунку близького короткого замикання синхронного двигуна

У такому випадку періодичні складові струмів від системи і двигунів, відповідно дорівнюватимуть в відносних одиницях (відповідно до системи одиниць

$$I_{c.к.з} = U / x_{c.к.з} \approx 1,05 / x_{c.к.з}; \quad (3)$$

$$I_{\deltaв.к.з} = E_q'' / x_{\deltaв.к.з} \approx 1,05 / x_{c.к.з}, \quad (4)$$

де $I_{c.к.з}$ - струм, що протікає від мережі до місця короткого замикання, $I_{\deltaв.к.з}$ - струм, протікає від синхронного двигуна до місця короткого замикання в момент $t = 0$; U - напруга мережі в момент; E_q'' - напруга, що розвивається СД в генераторному режимі в момент $t = 0$.

Таким чином, повний струм в точці КЗ буде дорівнювати

$$I_{к.з} = I_{c.к.з} + I_{\deltaв.к.з} = 1,05(1/x_{c.к.з} + 1/x_{\deltaв.к.з}). \quad (5)$$

Максимальне значення напруги на шинах при $t = 0$ складе

$$U_{III} = 1,05 x'_{к.з} (1/x_{c.к.з} + 1/x_{\deltaв.к.з}). \quad (6)$$

Опір зв'язку між двигуном і живлячим джерелом мережі

$$x_{св} = x_{\deltaв} + x_c + x_c \times x_{\deltaв} / x'_{к.з}. \quad (7)$$

Умова збереження стійкої роботи двигунів при короткому замиканні будь-якої тривалості за опором $x_{к.з}$ буде

$$x_{\deltaв} / x_{св} \geq (m_{мех} / m_{с.м.к} \times K_{\phi})_{макс}, \quad (8)$$

де $m_{мех}$ - момент на валу двигуна; $m_{с.м.к}$ - максимальна кратність синхронного моменту при номінальному збудженні, K_{ϕ} - кратність форсування збудження. У разі, якщо до шин підключе-

на група з n синхронних двигунів, слід у вираженні (8) відношення $m_{\text{мех}}/m_{\text{с.м.к}} \cdot K_{\phi}$ взяти для того двигуна, для якого це ставлення найбільше. Опір $x_{\text{дв}}$ для такого випадку можна визначити з вираження

$$1/x_{\text{дв}} = \sum_{i=1}^n 1/x_{\text{дв},i} = \sum_{i=1}^n 1/x_{\text{д},i} + x_{\text{р},i}. \quad (9)$$

Слід звернути увагу, що вираз (8) дає відносну величину напруги на виводах двигунів без урахування підживлення від самих двигунів. В дійсності, напруга на шинах при КЗ за опором $x_{\text{к.з}}$ буде трохи вище, однак для оцінки стійкості необхідно залишкову напругу на шинах визначити саме як відношення $x_{\text{дв}}/x_{\text{св}}$. Ця напруга має зіставлятися з найбільшою величиною критичної напруги

$$U_{\text{кр.макс}} = (m_{\text{мех}}/m_{\text{с.м.к}} \times K_{\phi})_{\text{макс}}. \quad (10)$$

При практичних розрахунках, у випадках, коли дійсне напруга на шинах при КЗ з урахуванням підживлення від синхронних двигунів дорівнює або більше 70% від номінального, приймають $x_{\text{а.д}} = 0,7$. Якщо залишкова напруга на шинах нижче 70% від номінального, опору асинхронних двигунів приймаються $x_{\text{а.д}} = x_{\text{к.з}}$.

У тих випадках, коли виконується

$$x_{\text{дв}}/x_{\text{св}} < (m_{\text{мех}}/m_{\text{с.м.к}} \times K_{\phi})_{\text{макс}} \quad (11)$$

синхронні двигуни, підключені до шин, починають гальмуватися. швидкість зміни кута навантаження δ залежить від того, наскільки максимальне значення електромагнітного моменту з урахуванням зниженої напруги, що визначається тільки струмом від живильного джерела, буде менше моменту на валу. У загальному випадку для визначення швидкості зміни кута навантаження $\delta(t)$ і вирішення питання по допустимому часу відключення КЗ необхідно вирішити рівняння руху

$$J \times d\omega/dt = M_{\text{двиг.ел}} - M_{\text{мех}}, \quad (12)$$

де J - сумарний момент інерції двигуна і механізму, кгс·м²; $M_{\text{двиг.ел}}$ - крутний момент електродвигуна; $M_{\text{мех}}$ - механічний момент опору навантаження. Момент, що обертає синхронного електродвигуна являє собою сукупність асинхронного моменту $M_{\text{а}}$, синхронного моменту $M_{\text{с}}$ і генераторного моменту $M_{\text{г}}$, обумовленого тільки струмом збудження. З врахуванням того, що асинхронний і синхронний моменти прискорюють ротор двигуна, а генераторний момент гальмує його, можна записати (12) у вигляді

$$J \cdot d\omega/dt = M_{\text{а}} + M_{\text{с}} - M_{\text{г}} - M_{\text{мех}}. \quad (13)$$

Вирази для моментів $M_{\text{а}}$, $M_{\text{с}}$, $M_{\text{г}}$, з урахуванням неявнополюсності маємо

$$M_{\text{а}} = 1/2 \times U^2 (Im(1/x_{\text{д}} + 1/x_{\text{к}})); \quad (14)$$

$$M_{\text{с}} = E_{\text{q}} \times U / x_{\text{д}} \times \sin \delta; \quad (15)$$

$$M_{\text{г}} = (E_{\text{q}} / x_{\text{д}})^2 \times r / 1 - s, \quad (16)$$

де $s = d\delta/dt$ - ковзання у відносних одиницях.

Постійна інерції H і механічна постійна часу τ_j двигуна визначаються як

$$2H = GD^2 \times n_0^2 / 365 \times S_{\text{н}}; \quad (17)$$

$$\tau_j = GD^2 \times n_0^2 / 365 \times S_{\text{н}} = 2H \times \cos \varphi_{\text{н}}, \quad (18)$$

де $GD^2 - n_0$ - швидкість обертання, об/хв.

У відносних одиницях можна записати

$$J \times d\omega/dt = 2H ds/dt = 2H \times d^2\delta/dt^2 = \tau_j \times d^2\delta/dt^2 \times \cos \varphi_{\text{н}}. \quad (19)$$

З урахуванням (14), (15), (16), (18) рівняння руху (13) запишеться у вигляді

$$2H \frac{d^2\delta}{dt^2} = \tau_j \frac{d^2\delta}{dt^2} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} = \frac{1}{2} U^2 (Im(\frac{1}{x_{\text{д}}} + \frac{1}{x_{\text{к}}})) + \frac{E_{\text{q}} \cdot U}{x_{\text{д}}} \cdot \sin \delta - (\frac{E_{\text{q}}}{x_{\text{д}}})^2 \cdot \frac{r}{1-s} - M_{\text{мех}}. \quad (20)$$

Зміна ковзання при вибігу може бути визначено з рівняння руху (20) при $U = 0$, прийнявши

за позитивний напрямок зміни кута – напрямком його відставання від поля (мінємо знак при $d^2\delta/dt^2$). При відсутності живлення, складові синхронного моменту і асинхронний момент будуть дорівнюють нулю і рівняння руху набуває вигляду

$$\tau_j \times d^2\delta/dt^2 = \tau_j \times ds/dt = M_{mex} + (E_q/x_d)^2 \times r/1-s \times 1/\cos\varphi_n. \quad (21)$$

Складова генераторного моменту з'являється при підживленні місця короткого замикання. Оскільки цей режим, як правило, нетривалий, можна вважати генераторний момент не залежним від ковзання. При синхронній частоті обертання і номінальному збудженні цей момент складе 10-20% від номінального моменту двигуна. Він може бути врахований у відповідності з виразом

$$\tau_j \times d^2\delta/dt^2 = M_{mex} + (0,1 \div 0,2) \times K_\phi^2, \quad (22)$$

де K_ϕ - кратність форсування збудження.

При короткочасній перерві живлення через відключення двигуна від живильної мережі генераторний момент відсутній. При цьому механічний момент можна також вважати не залежним від ковзання. Тоді рішенням рівняння (22) буде

$$s = M_{mex}/\tau_j \times t, \quad (23)$$

де t - час, що минув після відключення живлення.

Якщо до шин підстанції підключена група двигунів, то при близькому короткому замиканні їх вибіг відбуватиметься за індивідуальними характеристиками. При відключенні групи двигунів від мережі живлення їх вибіг буде груповим поки напруга на шинах не впаде нижче $0,4 \div 0,5U_n$. У цьому випадку генераторний момент від струму збудження матиме місце, якщо в вибігу беруть участь асинхронні двигуни. Однак величина цього моменту значно менше, ніж при короткому замиканні і його можна не враховувати.

Ковзання при груповому вибігу буде знаходитися аналогічно одиночному, при цьому у виразі (24) необхідно буде замінити момент і механічну постійну часу на наведені величини

$$M_{mex.np} = \sum_{i=1}^n M_{mex.i} \times P_{n.i} / \sum_{i=1}^n P_{n.i}; \quad (24)$$

$$\tau_{jnn} = \sum_{i=1}^n \tau_{ji} \times P_{n.i} / \sum_{i=1}^n P_{n.i}. \quad (25)$$

Для визначення кута повороту осі ротора двигуна щодо вектора напруги мережі проінтегруємо (22), отримаємо

$$\delta = \delta_0 + M_{mex}/\tau_j \times t^2/2, \quad (26)$$

де $\delta_0 = \arctg x_q \times P_0/U_0^2 + x_q \times Q_0$ – визначається попередньою навантаженням, для групового вибігання замінюється на $\delta_{0np} = \sum_{i=1}^n \delta_{0i} \times P_{n.i} / \sum_{i=1}^n P_{n.i}$.

Якщо в (25) підставити τ_j і t в секундах, кут δ в радіанах визначиться з виразу

$$\delta = \delta_0 + \pi \int_0 \times M_{mex}/\tau_j \times t^2/2. \quad (27)$$

З виразу (29) можна знайти час, за який ротор відстане від вектора напруги мережі на кут $\delta_0 + \pi$

$$t_{\delta_0+\pi} = \sqrt{\tau_j/50 \times M_{mex}}. \quad (28)$$

У практичних розрахунках часто користуються критерієм 100% -ої ймовірності входження в синхронізм

$$s_{cp} \leq s_{кр} = 1,05 \sqrt{M_{c.m.k}/\tau_j}, \quad (29)$$

де s_{cp} – середнє ковзання, відповідне точці перетину характеристики механічного моменту на валу із середньою асинхронною характеристикою.

Підставивши (23) в (29) отримаємо

$$s = M_{mex}/\tau_j \times t \leq 1,05 \sqrt{m_{c.m.k}/\tau_j}. \quad (30)$$

Звідки знаходимо граничний час відключення КЗ (повторної подачі живлення) при якому

забезпечується 100% -ва ймовірність входження в синхронізм

$$t_{np} \leq 1,05/m_{mex} \sqrt{m_{c.m.k} \times \tau_j}. \quad (31)$$

Розрахунки для реальних двигунів показують, що допустимий час перерви живлення, при якому забезпечується 100% -ва ймовірність успішної ресинхронізації не перевищує 0,3 с.

Висновки та напрямок подальших досліджень. При перерві живлення через коротке замикання на суміжному елементі мережі, у випадку, якщо кут навантаження δ не виріс до критичної величини, при якій можливе порушення динамічної стійкості, електромеханічний перехідний процес носить характер згасаючих синхронних коливань [8].

Втрата живлення, обумовлена трифазним коротким замиканням в неактивній кабельній мережі, не приведе до випадання синхронних двигунів із синхронізму лише в тому випадку, якщо мережа забезпечена швидкодіючими захистами, які відключають міжфазні короткі замикання без витримки часу. Якщо міжфазні короткі замикання в неактивній кабельній мережі будуть відключатися хоча б з одним ступенем витримки часу, наприклад, $\Delta t = 0,25 \div 0,3$ с, то загальний час перерви живлення складе $0,4 \div 0,5$ с і синхронні двигуни обов'язково випадуть із синхронізму [8].

Короткі замикання в реактивних кабельних мережах, як правило, не призводять до випадання синхронних двигунів з синхронізму, оскільки в цих випадках залишкову напругу на шині перевищує $0,5, 0,6U_{ном}$ досить тривалий час ($2 \div 3$ с) [8].

При відновленні напруги після відключення короткого замикання на суміжному елементі мережі, струми і електромагнітні моменти обертання, що виникають в синхронних двигунах, як правило, менше, ніж при несинхронному включенні, обумовленому дією пристроїв АПВ і АВР, так як результуючий магнітний потік двигуна в цьому випадку значно ослаблений через розмагнічуючого ефекту струму короткого замикання. В даний час у зв'язку з використанням механізмів Бавра став можливий синхронний самозапуск СД, без необхідності гасіння поля [8].

Список літератури

1. **Важнов А.И.** Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л. Энергия, 1980 г.
2. **Гамазин, С.И.** Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой/ **С.И. Гамазин, В.А. Ставцев, С.А. Цырук.** – М.: Издательство МЭИ, 1997. – 424 с.
3. **Горев, А.А.** Переходные процессы синхронной машины/ **А.А. Горев.** – М., Л.: Государственное энергетическое издательство, 1950. – 552 с.
4. ГОСТ 13109-97 Межгосударственный стандарт. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 1999. – 64 с.
5. **Ковач, К.П.** Переходные процессы в машинах переменного тока/ **К.П. Ковач, И. Рац.** – М.-Л., Госэнергоиздат, 1963.
6. **Слодарж, М.И.** Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных двигателей/ **М.И. Слодарж.** – М.: «Энергия», 1977. – 215 с.
7. Справочная книга для электротехников. Том 5/ под общ. ред. профессоров **М.А. Шателена, В.Ф. Миткевича, В.А. Толвинского.** – Л.: КУБУЧ, 1934. – 204 с.
8. **Михалев С. В.** Система поддержания устойчивости работы синхронных электродвигателей 6-10 кВ. /Текст диссертаций/ Санкт-Петербург/ 2014. – 121 с.
9. **Беляев, А.В.** Автоматика и защита на подстанциях с синхронными и частотно-регулируемыми электродвигателями большой мощности/ **А.В. Беляев,** – Санкт-Петербург: ПЭИПК, 2012.
10. **Беляева Е.Н.** Как рассчитать ток короткого замыкания/ **Е.Н. Беляева.** – М: Энергоатомиздат, 1983. – 137 с.

Рукопис подано до редакції 08.05.2018

УДК 697.34

О.М. ГОЛИШЕВ, д-р техн. наук, проф., В.А. КОНОВАЛЮК, канд. техн. наук, доц.,
Д.В. МИХАЛКІВ, ст. викладач, К.О. ФІЛОНОВА, асистент
Криворізький національний університет

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦІЇ ЗІ ЗМІННОЮ ВИТРАТОЮ ПОВІТРЯ В УМОВАХ БУДІВЕЛЬ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДІВ

Мета. Метою даної роботи є визначення перспектив застосування для приміщень громадських будівель вентиляційних систем зі змінною витратою повітря (VAV-систем, «Variable Air Volume» - змінна витрата повітря), що враховують фактичний режим використання приміщень при різних навантаженнях по кількості людей та, відповідно,