

ЗАСТОСУВАННЯ УМОВНО ДВНАДЦЯТИФАЗНОГО КЕРОВАНОГО КОМПЕНСАЦІЙНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ ПОСЛІДОВНОГО ПРЯМОГО ЗАПУСКУ ВІД ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ЧОТИРЬОХ ПОТУЖНИХ АСИНХРОННИХ МАШИН

О.І. Чиженко*, докт. техн. наук, О.Б. Рибіна, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: alivchizh@ukr.net; rybina@i.ua.

Розглядається послідовний прямий запуск чотирьох асинхронних машин (АМ) потужністю 8 МВт кожна від електричної мережі 6 кВ. Досліджуються пускові перехідні режими, які виникають у мережі внаслідок такого запуску АМ, і можливі при цьому наслідки для мережі. Задля полегшення прямого запуску АМ потужністю 8 МВт пропонується застосовувати умовно дванадцятифазний керований компенсаційний перетворювач, який обмежує величину пускових надструмів у мережі. Бібл. 10, рис. 6.

Ключові слова: електрична мережа, прямий запуск асинхронних машин, пускові перехідні режими, пускові надструми.

В електроенергетиці існує проблема прямого запуску від електричної мережі 6 кВ асинхронних машин (АМ) потужністю 8 МВт. АМ такої потужності використовуються, зокрема, у резервних насосах систем охолодження ТЕС і АЕС. Проблема полягає у тому, що при прямому запуску потужних АМ у мережі виникають пускові надструми, які можуть мати настільки значну величину, що здатні нанести суттєву шкоду встановленому у мережі обладнанню. Ці надструми, протікаючи по лінії електропередачі (ЛЕП) та розподільчому трансформатору на її вході, спричиняють на їх опорах падіння напруги [1]. Такі втрати напруги, в свою чергу, призводять до просідання її на вхідних клеммах АМ [2, 3] іноді до такого рівня, який унеможливує успішний прямий запуск АМ. Ця проблема ще поглиблюється, коли від мережі запускається не одна потужна електромашина, а здійснюється послідовний прямий запуск декількох потужних АМ. Тому розроблення ефективних засобів, які допомагають здійснювати прямий запуск АМ, є актуальною і сучасною задачею електроенергетики.

У випадку запуску резервних насосів систем охолодження ТЕС і АЕС необхідним є саме прямий їх запуск, тому що він вбачається більш швидкісним за екстреного вводу цих насосів з метою запобігання перегріву обладнання електростанцій, тобто задля уникнення можливих аварійних ситуацій, пов'язаних з перегрівом. З практики експлуатації реальних АЕС відомі ситуації, наприклад, на болгарській АЕС у місті Козлодуй, коли незначне зволікання з вводом резервних насосів системи охолодження призвело до примусового відключення реактору цієї АЕС, що фахівцями розглядалося як загрозна аварійна ситуація та одержало міжнародний розголос. Щось схоже сталося і внаслідок затоплення Фукусімської АЕС – втрата живлення циркуляційними насосами. Тому у таких випадках саме прямий запуск насосів є більш бажаним, ніж використання систем запуску поступового розгону обертів валу АМ, який використовується у частотних засобах (з керованою поступово зростаючою частотою обертів валу і виводом їх на номінальну частоту), софстарторах та інших [4].

Задля полегшення пускових режимів мережі, яка живить потужне електро cơchanічне навантаження, найбільш ефективним є застосування вентильних напівпровідникових компенсаційних перетворювачів [5–8], котрі у пусковому перехідному режимі мережі генерують у неї коливальний ємнісний за характером струм, величина якого керується кутом управління α тиристорів перетворювача. Цей коливальний ємнісний струм компенсує у мережі коливальний індуктивний за своїм характером струм, який супроводжує прямий запуск АМ й тим самим зменшує індуктивні надструми безпосередньо у самій електричній мережі, чим суттєво полегшує в ній важкі пускові перехідні режими.

Приклад послідовного прямого запуску від мережі 6 кВ чотирьох АМ потужністю 8 МВт розглянуто у роботі [9], де як засіб полегшення режиму прямого пуску АМ використовувався двомосто-

© Чиженко О.І., Рибіна О.Б., 2024

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-1178-0036>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

вий компенсаційний тиристорний перетворювач, у якому кожен з тиристорних мостів виконувався за шестипульсною схемою Ларіонова, а самі ці мости через фазозсувний трансформатор приєднувалися паралельно відносно мережі. У фазозсувному трансформаторі здійснювався зсув фази напруги живлення одного тиристорного моста відносно другого на 30 ел.градусів, завдяки чому покращувався гармонійний склад вхідного струму перетворювача (він же струм мережі) в цілому – мінімізувались амплітуди 5-ої і 7-ої гармонік цього струму.

У роботі замість двохмостового перетворювача використовується умовно дванадцятифазний за дванадцятипульсною схемою, де тиристорні мости ввімкнені між собою послідовно відносно кола випрямленого струму. Збільшення удвічі частоти пульсацій у колі випрямленого струму випрямного моста дає можливість суттєво зменшити індуктивність згладжуючого дроселя, який є невід'ємною частиною цього кола. Таким чином зменшуються масогабаритні, трудомісткі та вартісні (в процесі виробництва цього необхідного у схемі елемента) показники перетворювача. Як наслідок, вищезгадана заміна двохмостового на умовно дванадцятифазний перетворювач призводить до покращення технікоекономічних показників засобу для полегшення послідовного прямого пуску чотирьох АМ потужністю 8 МВт від мережі 6 кВ, тобто підвищує його ефективність, зокрема підвищується швидкість пристрою. Окрім цього, як буде показано нижче, у запропонованому до використання перетворювачі спрощується конструкція конденсаторних батарей (КБ), зменшується кількість КБ, які форсовано підключаються в момент пуску першої АМ. При цьому звісно зменшується удвічі й число засобів для комутації КБ – для їх приєднання і від'єднання, а їхня ємність зменшується на 100 мкФ і, як слідство, зменшуються масогабаритні та вартісні показники цих КБ.

Для досліджень режимів послідовного прямого пуску від мережі чотирьох АМ потужністю 8 МВт було складено комп'ютерну модель, структурована схема якої наведена на рис. 1, де мережа, яка моделюється трифазною системою ЕРС – E_{syst} (у нашому випадку діюче значення ЕРС $E_{syst} = 6$ кВ), з внутрішнім опором Z_{syst} , який моделює опори ЛЕП та вхідного розподільчого трансформатору на

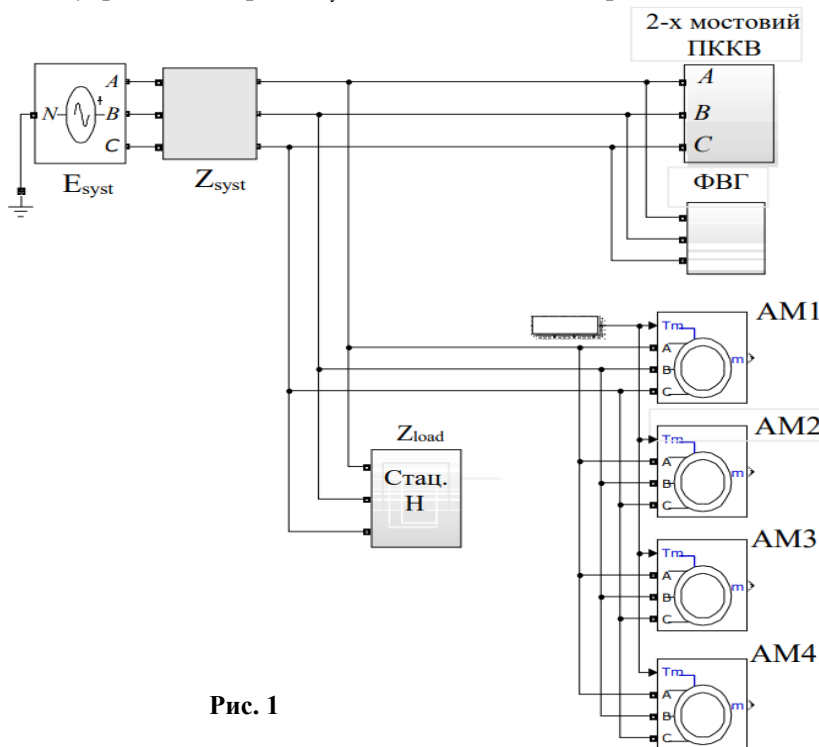


Рис. 1

вході мережі. У випадку режиму, що розглядається, активна складова опору Z_{syst} дорівнює $r_{syst} \approx 0.002$ Ом, а його реактивна складова – $x_{syst} = \omega L_{syst} \approx 0.055$ Ом ($L_{syst} \approx 17.4$ мГн) живить вузлове комплексне навантаження, яке складається із стаціонарної складової Н. Воно змодельовано паралельним з'єднанням активного r_H та реактивного x_H опорів (у випадку режиму, що розглядається, $r_H \approx 1.5$ Ом, $x_H = \omega L_H \approx 2$ Ом ($L_H \approx 6.2$ мГн)) і електро механічного опору, який змодельовано чотирма паралельно з'єднаними асинхронними машинами АМ1, АМ2, АМ3 та АМ4 потужністю 8 МВт кожна.

У роботі прийнято відлік часу від моменту $t = t_H = 0$, в який до мережі підключається стаціонарне навантаження Н.

Прямий запуск чотирьох АМ здійснюється у часі послідовно через 50 мс, а саме відповідно з прийнятим відліком часової змінної t у моменти часу: $t_{AM1} = 0.11$ с, $t_{AM2} = 0.16$ с, $t_{AM3} = 0.21$ с і $t_{AM4} = 0.26$ с. Як модель кожної з чотирьох АМ взято модель, описану у роботі [10].

Тиристорний перетворювач – потужний керований компенсаційний випрямляч (ПСКВБ), який використовується для коригування пускових струмів і напруги мережі – у моделі рис. 1 виконано по умовно дванадцятифазній схемі, наведеній на рис. 2. На рис. 1: ФВГ – це фільтр вищих гармонік струму, який уособлює собою три фільтри ФВГ1, ФВГ2 і ФВГ_{мер} схеми на рис. 2.

В схемі рис. 2: ТРФЗ – трифазний трьохобмотковий фазозсувний трансформатор, який забезпечує зсув на 30 ел. град фази напруги на вході моста М2 відносно напруги на вході моста М1. При потребі цей же трансформатор може використовуватися також для узгодження величин напруг на входах мостів М1 і М2 з напругою електричної мережі, яка їх живить. Між входами тиристорних мостів М1 та М2 і вторинними обмотками фазозсувного трансформатору ТРФЗ ввімкнені конденсаторні батареї КБ1 і КБ2. У випадку режиму, що розглядається, у кожній стороні трикутників цих конденсаторних батарей встановлено конденсатори ємністю $C_{\Delta}=50$ мкФ. Ще одну конденсаторну батарею КБ_{мер}, спільну для обох мостів М1 і М2, ввімкнено перед первинною обмоткою ТРФЗ у кожній стороні трикутника конденсаторів цієї батареї, ємність яких $C_{\Delta\text{мер}}$ складається з двох частин – стаціонарної $C_{\Delta\text{мер}1}$ та $C_{\Delta\text{мер}2}$. Остання приєднується до мережі ситуативно в залежності від конфігурації електромеханічної складової навантаження. Таким чином, $C_{\Delta\text{мер}}=C_{\Delta\text{мер}1}+C_{\Delta\text{мер}2}$. Ємність $C_{\Delta\text{мер}2}$ приєднується у момент $t=t_{\text{АфорМ1}}=0.1$ с, форсуючи зростання ємнісного струму перетворювача перед прямим пуском АМ1 у момент $t=t_{\text{АМ1}}=0.11$ с, та від'єднується від мережі по закінченні пускового перехідного режиму.

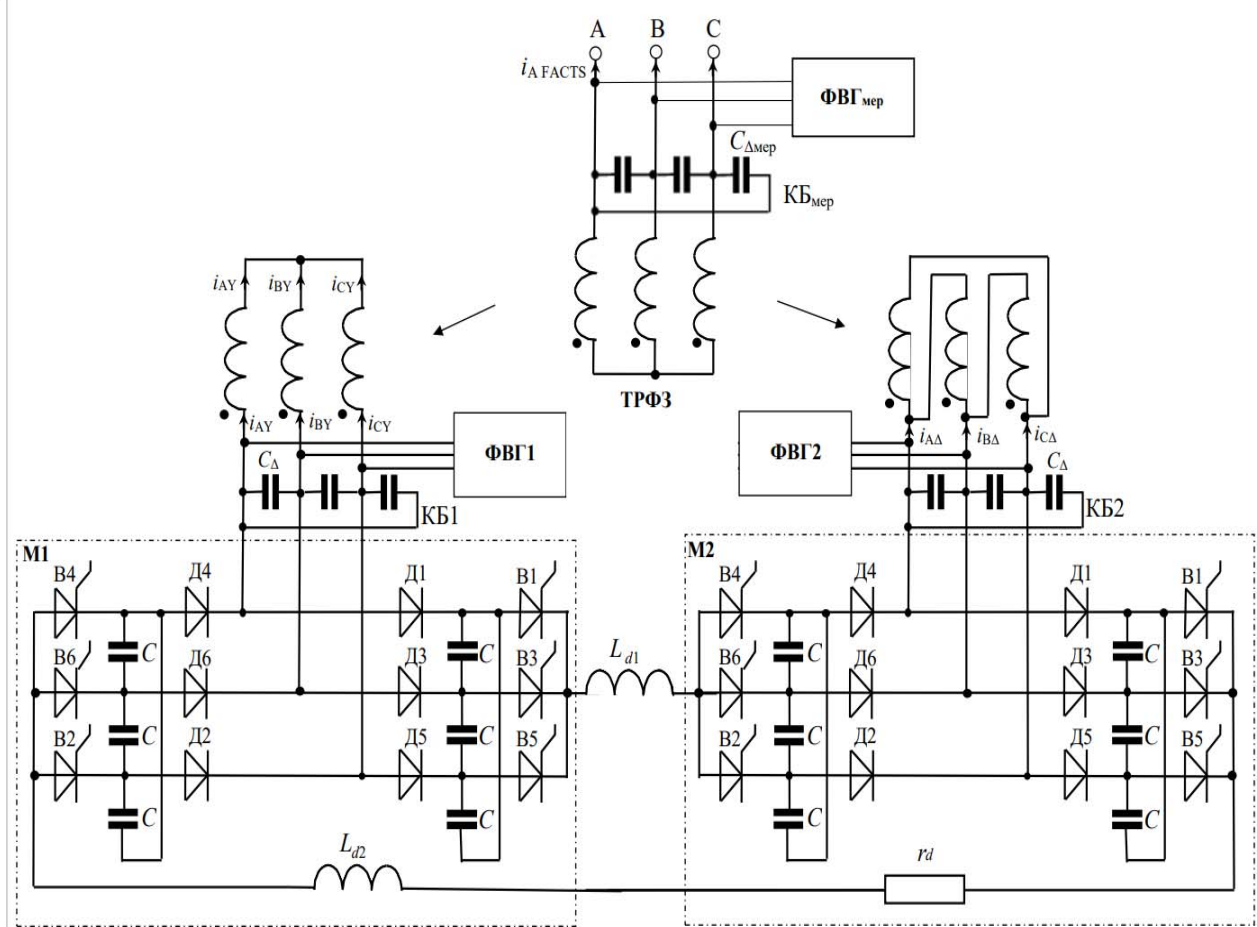


Рис. 2

В нашому випадку $C_{\Delta\text{мер}1}=50$ мкФ, $C_{\Delta\text{мер}2}=1500$ мкФ. З конденсаторами C_{Δ} (батареї КБ1 і КБ2) і $C_{\Delta\text{секц}1}$ для їх захисту ввімкнено послідовно дроселі з індуктивністю $L_{\Delta}=L_{\Delta\text{секц}1}=10$ мкГ відповідно, а послідовно з конденсатором $C_{\Delta\text{секц}2}$ – дросель з індуктивністю $L_{\Delta\text{секц}2}=50$ мкГ. Згладжуючий дросель L_d у колі випрямленого струму ПККВ з метою забезпечення кращої симетрії випрямленого струму i_d теж виконується з двома складовими, тобто $L_d=L_{d1}+L_{d2}$. У випадку режиму, що розглядається, $L_{d1}=L_{d2}=0.25$ Гн, активний опір дроселя L_d складає $r_d=0.02$ Ом. Параметри елементів тиристорних мостів М1 і М2 такі ж самі, які використовувалися у моделі, розглянутій у роботі [9].

Метою роботи є дослідження електромагнітних перехідних режимів у електричній мережі 6 кВ під час послідовного прямого пуску від неї чотирьох асинхронних машин потужністю 8 МВт, з'ясування параметрів пускового режиму.

Задля досягнення поставленої мети для моделі, зображеної на рис. 1, в середовищі MATLAB SIMULINK розроблено програму розрахунків електромагнітних перехідних процесів, що виникають за послідовного прямого пуску від мережі 6 кВ чотирьох АМ потужністю 8 МВт. Результати розрахунків наведено нижче (рис. 3–5) у вигляді часових діаграм перехідних струмів і напруги на елементах моделі рис. 1.

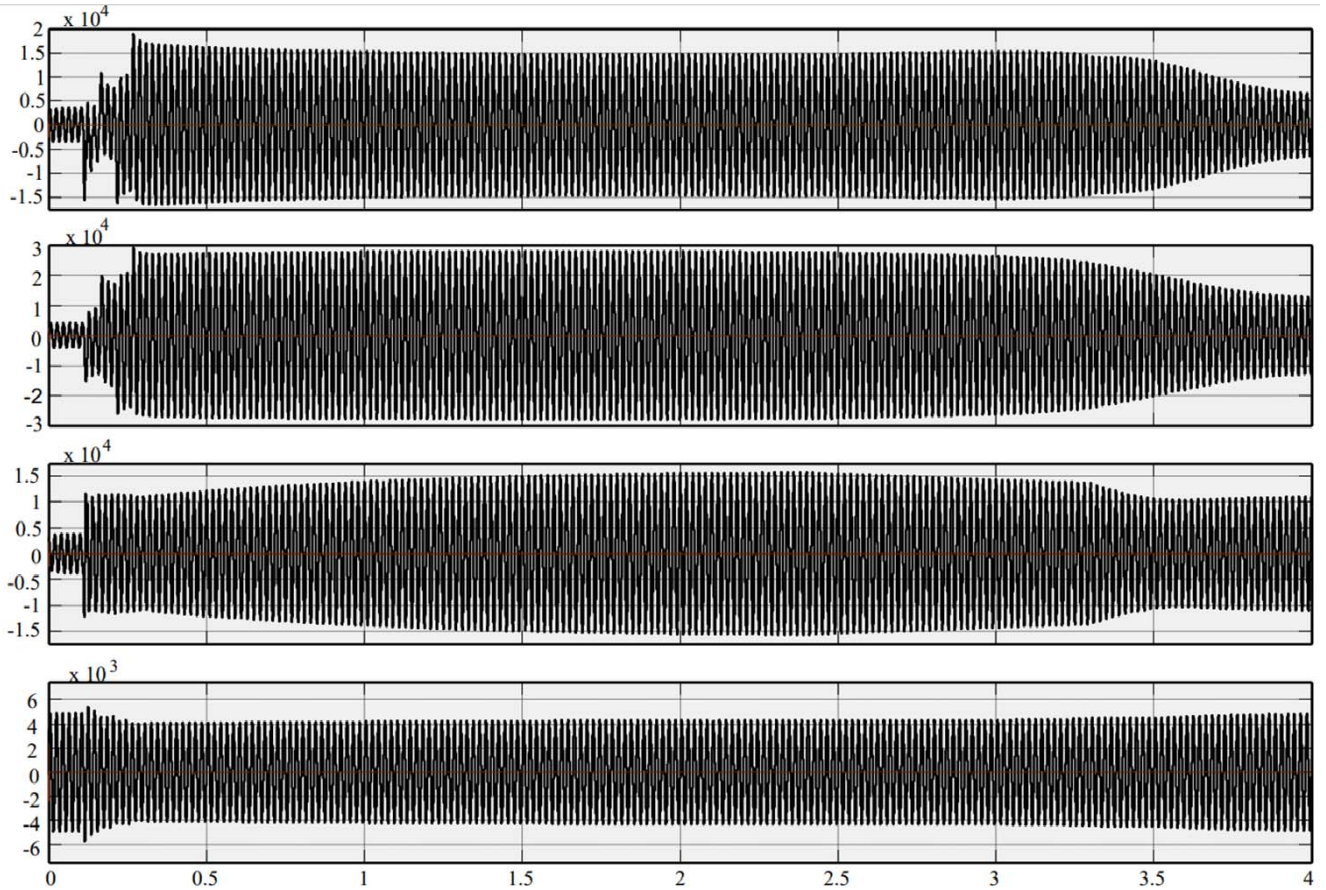


Рис. 3

На рис. 3 на першій (верхній) діаграмі наведено коливальні пускові фазні струми $i_{\text{фмер}}$ мережі (жирним на цій діаграмі виділено струм $i_{A\text{мер}}$ фази A); на другій (зверху) діаграмі – індуктивні за характером коливальні перехідні фазні струми $i_{\text{ф4АМ+Н}}$ (жирним виділено струм $i_{A4\text{АМ+Н}}$ фази A) на вході комплексного навантаження електричної мережі, електромеханічна складова якого а саме струм $i_{A4\text{АМ}}$ (приблизно саме такий струм тік би у мережі рис. 1, коли у цій моделі був би відсутнім ПККВ), а його інша складова, саме струм $i_{\text{Н}}$ – через $r-L$ опір стаціонарного навантаження H . Ці складові разом у сумі і утворюють струм $i_{A4\text{АМ+Н}} = i_{A4\text{АМ}} + i_{\text{Н}}$; на третій діаграмі $i_{\text{АПККВ+КБ}}$ зображено ємнісні за характером коливальні фазні струми $i_{\text{фПККВ+КБ}}$ (жирним виділено струм $i_{A\text{ПККВ+КБ}}$ фази A) ПККВ (який тут розглядається як єдине ціле разом з передввімкненими перед мостами M1 і M2 конденсаторними батареями, відповідно КБ1 і КБ2 – див. схему рис. 2); на четвертій діаграмі показано пускову коливальну фазну напругу мережі $u_{A\text{мер}}$ на вході, тобто між фазою A і нульовим дротом.

Задля забезпечення більш якісної компенсації індуктивного за характером струму $i_{A4\text{АМ+Н}}$ ємнісним струмом $i_{\text{АПККВ+КБ}}$ управління тиристорами у схемі рис. 2 здійснюється наступним чином: у моменти перед запусками перших двох АМ, а саме у $t_{\text{форАМ1}} = 0.1$ с і $t_{\text{форАМ2}} = 0.145$ с відбувається форсоване збільшення значень кута управління тиристорами у мостах M1 і M2 . Ці кути набувають значень відповідно $\alpha_{\text{форАМ1}} = -90$ ел.град і $\alpha_{\text{форАМ2}} = -81$ ел.град. На етапі спадання значень струму $i_{\text{АПККВ+КБ}}$ у момент $t = t_{\text{змен1}} = 2.5$ с встановлюється кут управління $\alpha = \alpha_{\text{змен1}} = -85$ ел.град, а у момент $t = t_{\text{змен2}} = 3.3$ с – кут управління $\alpha = \alpha_{\text{змен2}} = -92$ ел.град. На інтервалі $0 < t < 0.1$ с ПККВ функціонує у режимі очікування пуску АМ1 з кутом $\alpha = \alpha_{\text{мін}} = -104$ ел.град, якого достатньо для компенсації індуктивної складової струму $i_{\text{Н}}$.

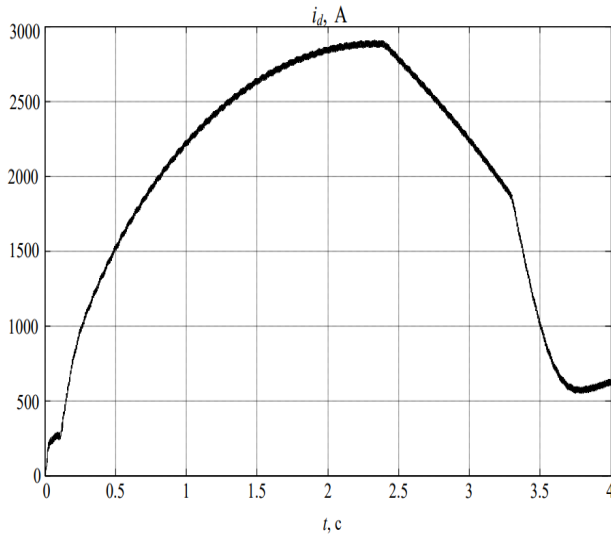


Рис. 4

коливання ємнісного струму $i_{АПККВ+КБ}$ на інтервалі $1.5 \text{ с} \leq t \leq 2.5 \text{ с}$ досягають своїх максимальних значень – практично 20000 А.

Під час прямого пуску потужного електромеханічного навантаження суттєвим фактором його успішного здійснення є швидкодія ПККВ, тобто швидкість зростання та спадання у ньому струму $i_{АПККВ+КБ}$ на відповідних ділянках його змінення з метою забезпечення належної компенсації індуктивної складової струму $i_{А4АМ+Н}$. Така швидкодія на практиці безпосередньо пов'язана з швидкістю змін струму i_d у колі випрямленого струму ПККВ, а саме із сталою часу $\tau = L_d / r_d$ цього кола.

На часовій діаграмі рис. 4 показано, як у перехідному режимі на інтервалі $0 \leq t \leq 4 \text{ с}$ змінюється у часі перехідний випрямлений струм $i_d = i_{d1} = i_{d2}$. З цієї діаграми видно, що у моменти $t_{\text{форАМ1}} = 0.1 \text{ с}$, $t = t_{\text{змен1}}$ і $t = t_{\text{змен2}}$ у кривій струму i_d відбуваються злами (тобто стрибкоподібно змінюється похідна di_d/dt), що є наслідком стрибкоподібного зменшення у ці моменти кута управління α , а саме до значень $\alpha_{\text{форАМ1}}$, $\alpha_{\text{змен1}}$ і $\alpha_{\text{змен2}}$ відповідно.

Наприкінці цієї діаграми, де спостерігається набуття перехідними струмами і напругою їх усталених значень, тобто на інтервалі $3.6 \text{ с} \leq t \leq 4 \text{ с}$, спостерігається також деяке зростання струму i_d . Це зростання відбувається внаслідок того, що в цей же час відбувається зростання по мірі її встановлення перехідної напруги мережі $u_{\text{Амер}}$, а відповідно, як слідство цього, і зростання перехідної випрямленої напруги u_d , що можна побачити на останній діаграмі рис. 3.

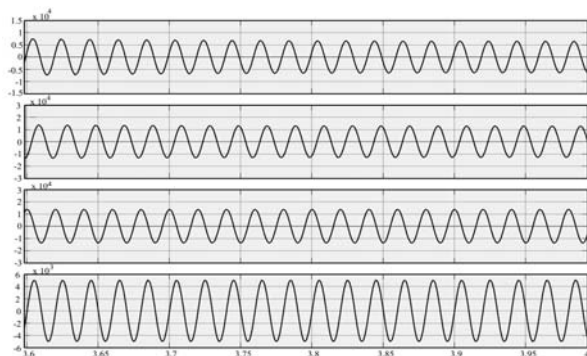


Рис. 5

періодів коливань близько 20000 А), який генерується потужним керованим компенсаційним випрямлячем ПККВ разом з конденсаторними батареями КБ1, КБ2 і КБ_{мер}. З рис. 5 видно, що усталені на цьому інтервалі струми $i_{А4АМ+Н}$ і $i_{АПККВ+КБ}$ знаходяться у протифазі, тобто остання компенсує першу.

На всьому цьому інтервалі розрахунків перехідного пускового режиму забезпечується достатня стабільність значень амплітуд півперіодів коливань напруги мережі $u_{\text{Амер}}$ на вході ПККВ.

На діаграмах рис. 3 розрахунок перехідних пускових струмів і напруги здійснюється на інтервалі часу $0 \leq t \leq 4 \text{ с}$, який охоплює весь перехідний режим – від його початку до встановлення усталених значень струмів і напруги.

З часових діаграм рис. 3 можна побачити, що на всьому інтервалі $0.5 \text{ с} \leq t \leq 4 \text{ с}$ струм $i_{\text{Амер}}$ не перебільшує 15000 А, при цьому амплітуди півперіодів коливання індуктивного за характером струму $i_{А4АМ+Н}$, а саме він би протікав у мережі за відсутності ПККВ, на інтервалі $0.3 \text{ с} \leq t \leq 2.5 \text{ с}$ дорівнюють 30000 А, тобто у два рази більші. Таким чином, завдяки наявності у моделі рис. 1 ПККВ на інтервалі $0.5 \text{ с} \leq t \leq 2.5 \text{ с}$ вдається суттєво зменшити пусковий струм мережі, практично у два рази. Також, хоча і в менших межах, у мережі відбувається зменшення і ударних пускових надструмів безпосередньо у моменти прямого пуску АМ. При цьому амплітуди півперіодів

Діаграми рис. 5 є прикінцевою частиною діаграм рис. 3. На них перехідні пускові струми і напруга досягли своїх усталених значень. На інтервалі $3.6 \text{ с} \leq t \leq 4 \text{ с}$ з першої та останньої діаграм можна побачити, що вже усталений на цьому інтервалі струм $i_{\text{Амер}}$ за фазою співпадає з усталеною же на ньому інтервалі напругою $u_{\text{Амер}}$. Це свідчить про те, що усталений струм $i_{\text{Амер}}$ за характером на цьому інтервалі є чисто активним. Тобто у моделі, що розглядається, відбувається повна компенсація індуктивного струму $i_{А4АМ+Н}$ (з максимальною амплітудою півперіодів коливань близько 30000 А) ємнісним струмом $i_{АПККВ+КБ}$ (з максимальною амплітудою пів-

Важливим питанням під час розгляду практичного застосування перетворювача по схемі рис. 2 та реального забезпечення його режиму полегшення прямого пуску від електричної мережі 6 кВ декількох АМ потужністю 8 МВт є наявність необхідних для цього серійних доступних напівпровідникових приладів, що виробляються сучасною електронною промисловістю, які здатні на практиці забезпечити цей режим. Тобто експлуатаційні характеристики реально існуючих натеper приладів повинні задовольняти і забезпечувати роботу перетворювача на найважчих ділянках перехідної пускової коливальної кривої ємнісного струму $i_{АПККВ+КБ}$ (третя часова діаграма на рис. 3), який саме і генерується цим перетворювачем по схемі рис. 2. Найважчим моментом є момент $t = t_{\max АПККП+КБ} = 2.4$ с, у якому крива $i_{АПККВ+КБ}$ набуває свого максимуму 15770 А. У невеликій околиці цього моменту має місце найвужчий інтервал, коли до замкнутого тиристора прикладається від'ємна запірна для нього напруга. Тим не менш, на цьому інтервалі повинно відбутися гарантоване запирання цього тиристора. За це серед характеристик тиристора відповідає параметр τ_q , який визначає інтервал часу гарантованого закриття тиристора. Тобто інтервал, позначимо його як Δt_{thyr} , на якому до запертого тиристора прикладається від'ємна напруга, що повинна його заперти, має перебільшувати параметр τ_q , інакше можливе так зване «повторне запалювання» тиристора, тобто несанкціонований його вхід у роботу, що для перетворювача по схемі рис. 2 є аварійним режимом. На часовій діаграмі рис. 6 показано на інтервалі, найближчому до моменту $t = t_{\max АПККП+КБ}$, напругу (у кіловольтах) на запертому тиристорі. З цієї діаграми випливає, що $\Delta t_{thyr} \approx 54$ мкс, тобто повинно виконуватися $\tau_q < 54$ мкс. Цим вимогам відповідають серійні швидкодіючі тиристори 5STF18F1210 (у яких параметр $\tau_q = 10$ мкс, зворотна напруга $U_{\max B} = 1200$ В, а максимальний прямий струм $I_{\max B} = 1779$ А) та їх послідовно-паралельні збірки. Останні забезпечують належну величину струму (16 кА) у плечі мостів перетворювача та допустиму величину напруги (1.2 кВ) на тиристорах, розташованих у цьому плечі.

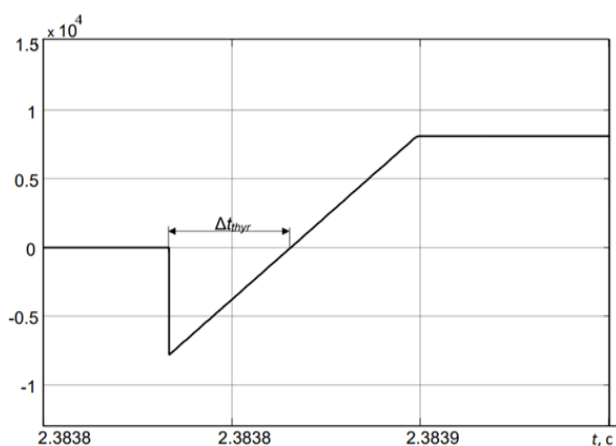


Рис. 6

від якої здійснюється послідовний прямий запуск чотирьох асинхронних машин потужністю 8 МВт кожна, дає можливість зменшити індуктивність згладжуючого дроселя у колі його випрямленого струму, і, відповідно, зменшити сталу часу цього кола, внаслідок чого у порівнянні з альтернативним схемо-технічним рішенням (з двомостовим перетворювачем) підвищується швидкодія пристрою та покращуються його масогабаритні та вартісні показники, тобто досягається його більша ефективність при використанні на практиці для коригування параметрів перехідного пускового режиму. Ємність у КБ, призначеної для форсування зростання ємнісного струму, яка приєднується попереджуючи прямий запуск першої АМ у пристрої, який пропонується, на 100 мкФ менша. Доведено, що цей перетворювач може бути реалізовано на доступній сучасній базі напівпровідникових приладів, які серійно виробляються.

Роботу виконано за бюджетною темою "Моделі та засоби запобігання погіршення якості електропостачання промислових споживачів" (Монітор 4) (КПКВК 65410).

1. Красношапка Н.Д., Пушкар М.В. Пускові режими асинхронних електроприводів з урахуванням опору лінії системи електропостачання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2022. Вип. 1. С. 39–43. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-39-43>.

2. Bokovi Y., Salami A.A., Mawugno Kodjo K., Dotche K.A., Bedja K. Comparative Study of the Voltage Drops Estimation on Electrical Distribution grid: Case study of the Togolese Company of Electricity and Energy grid. *IEEE PES/IAS PowerAfrica*, Abuja, Nigeria, 20–23 August 2019. Pp. 255–260. DOI: <https://doi.org/10.1109/PowerAfrica.2019.8928838>.

3. Beyhan H., Yalçın M., Kocamaz A.F. Matching Voltage Drop And Power Losses With GIS In Middle Voltage Electric Distribution Network In Diyarbakır. *International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, Malatya, Turkey, 21–22 September 2019. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/IDAP.2019.8875899>.

4. Pandey J.S., Bahadure S., Kanakgiri K., Singh N.M. Two-phase soft start control of three phase induction motor. *IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, New Delhi, India, 04–06 March 2016. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPES.2016.7584127>.

5. Справочник по преобразовательной технике. Под ред. Чиженка И.М. Киев: Техніка, 1978. 448 с.
6. Gan Wei, Ji Hongchao, Yang Xingwu. A three-phase PWM rectifier with reactive power compensation function. IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Hong Kong, China, 07-10 December 2014. DOI: <http://doi.org/10.1109/APPEEC.2014.7066073>.
7. Бойко В.С., Шкардун О.В. Умови перезаряду конденсаторів комутуючої ланки трифазного мостового компенсаційного перетворювача. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 3. С. 13–21. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.013>.
8. Бойко В.С., Шкардун О.В. Електромагнітні процеси у трифазному мостовому компенсаційному перетворювачі. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 4. С. 26–36. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.04.026>.
9. Butkevych O., Chyzenko O., Popovych O., Trach I., Golovan I. A Study of Transitional Modes of the Electric Network with the Powerful Electromechanical Load and FACTS. Proc. 6th International Conference IEEE on Energy Smart Systems (ESS). Kyiv, Ukraine, 17-19 April 2019. Pp. 261–266. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764223>.
10. Буткевич О.Ф., Чиженко О.І., Попович О.М., Трач І.В. Вплив FACTS на режим електричної мережі за прямого пуску потужної асинхронної машини у складі комплексного навантаження. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 6. С. 62–68. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764223>.

CONDITIONALLY TWELVE-PHASE CONTROLLED COMPENSATION CONVERTER FOR FACILITATING DIRECT START FROM THE ELECTRICAL NETWORK IN SERIES OF FOUR 8 MW ASYNCHRONOUS MACHINES

O.I. Chyzenko, O.B. Rybina

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteiskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: alivchizh@ukr.net; rybina@i.ua.

The sequential direct start-up of four asynchronous machines (AM) with a capacity of 8 MW each from a 6 kV electrical network is considered. The start-up transient modes that arise in the network as a result of such an AM start-up are investigated, as well as the possible consequences for the network. To facilitate the direct start of AM with a capacity of 8 MW, it is proposed to use a conditional twelve-phase controlled compensating converter, which limits the amount of starting overcurrents in the network. References 10, figures 6.

Keywords: electric network, direct start of asynchronous machines, starting transient modes, starting overcurrents.

1. Krasnoshapka N.D., Pushkar M.V. Modes of Asynchronous Electric Drives Taking into Account the Resistance of the Line of the Power Supply System. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. 2022. No 1. Pp. 39–43. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2022-160-1-39-43>. (Ukr)
2. Bokovi Y., Salami A.A., Mawugno Kodjo K., Dotche K.A., Bedja K. Comparative Study of the Voltage Drops Estimation on Electrical Distribution grid: Case study of the Togolese Company of Electricity and Energy grid. *IEEE PES/IAS PowerAfrica*, Abuja, Nigeria, 20-23 August 2019. Pp. 255–260. DOI: <https://doi.org/10.1109/PowerAfrica.2019.8928838>.
3. Beyhan H., Yalçın M., Kocamaz A.F. Matching Voltage Drop And Power Losses With GIS In Middle Voltage Electric Distribution Network In Diyarbakır. *International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, Malatya, Turkey, 21-22 September 2019. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/IDAP.2019.8875899>.
4. Pandey J.S., Bahadure S., Kanakgiri K., Singh N.M. Two-phase soft start control of three phase induction motor. IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS), New Delhi, India, 04-06 March 2016. Pp. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPS.2016.7584127>.
5. Handbook of Converter Technology. Edited by Chyzenka I.M. Kiev: Tekhnika, 1978. 448 p. (Rus)
6. Gan Wei, Ji Hongchao, Yang Xingwu. A three-phase PWM rectifier with reactive power compensation function. IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Hong Kong, China, 07-10 December 2014. DOI: <http://doi.org/10.1109/APPEEC.2014.7066073>.
7. Boiko V.S., Shkardun O.V. Conditions for recharging the capacitors of the commutating link of the three-phase bridge compensation converter. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. No 3. Pp. 13–21. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.03.013>. (Ukr)
8. Boiko V.S., Shkardun O.V. Electromagnetic processes in a three-phase bridge compensation converter. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2023. No 4. Pp. 26–36. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.04.026>. (Ukr)
9. Butkevych O., Chyzenko O., Popovych O., Trach I., Golovan I. A Study of Transitional Modes of the Electric Network with the Powerful Electromechanical Load and FACTS. Proc. 6th International Conference IEEE on Energy Smart Systems (ESS). Kyiv, Ukraine, 17-19 April 2019. Pp. 261–266. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS.2019.8764223>.
10. Butkevych O.F., Chyzenko O.I., Popovych O.M., Trach I.V. An influence of the FACTS upon an electrical network's mode during direct start-up asynchronous machine in the complex load's composition. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 6. Pp. 62–68. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.062>. (Ukr)

Надійшла 20.05.2024

Остаточний варіант 24.06.2024