

УДК 621.316

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2019.54.095>

НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ РЕГУЛЯТОР ДЛЯ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ МЕРЕЖІ В РАЗІ ПРЯМОГО ЗАПУСКУ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЗІСТАВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

О.І. Чиженко*, докт. техн. наук, **О.Б. Рибіна**, канд. техн. наук, **І.В. Трач****, канд. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: trachi@ied.org.ua

Розглянуто модифікацію схемотехнічного рішення напівпровідникового регулятора на базі тиристорного регульованого компенсатора, призначеного для коригування перехідних процесів у електричній мережі, які виникають внаслідок запуску від неї асинхронних двигунів зіставної з мережею потужності. Наведено математичну модель для розрахунку електромагнітних перехідних процесів, застосування якої дає змогу оцінити ефективність розроблених пристроїв у розподільних електричних мережах. У режимі пуску асинхронної машини з використанням тиристорного регульованого компенсатора досягається зменшення струму електричної мережі. Показано покращення керування режимами електричної мережі за допомогою запропонованої модифікації тиристорного регульованого компенсатора, який у своєму складі має косинусну конденсаторну батарею та не містить пасивні фільтри вищих гармонік. Бібл. 6, рис. 5.

Ключові слова: електрична мережа, перехідний процес, пускові струми, прямий пуск асинхронного двигуна, тиристорний регульований компенсатор, якість електроенергії.

У електричних мережах актуальною залишається проблема прямого запуску електро-механічного обладнання зіставної з мережею потужності. Ця проблема є складовою задачею покращення керування режимами електричної мережі обмеженої потужності в роботі з асинхронними двигунами (АД). Прямий пуск є важливим для обладнання, яке технологічно потребує високої швидкодії. Це, наприклад, стосується об'єктів швидкого реагування спеціального призначення, запуску потужних резервних живлячих насосів атомних та теплових електростанцій тощо. Прямий пуск АД, які входять до складу електромеханічного навантаження, супроводжується пусковими струмами, що можуть до 7 разів перевищувати їхні номінальні струми. Тому за умов, коли з питань безпеки немає змоги скласти попередній графік запуску обладнання зі зсувом у часі (наприклад, живлячі насоси АЕС і ТЕС), внаслідок чого пуск електродвигунів може збігатися у часі, їхні пускові струми, які в такому випадку додаються, здатні перевантажити мережу та погіршити режими її роботи й тим самим нанести шкоду електричному обладнанню. Надструми в разі прямого пуску АД створюють значні втрати напруги в елементах мережі та розподільчому трансформаторі. У результаті електрична мережа та її навантаження можуть функціонувати в нештатних режимах.

У [1] запропоновано вирішувати цю проблему встановленням напівпровідникового регулятора на основі тиристорного регульованого компенсатора (ТРК) реактивної потужності з відсічними діодами та наведено переваги такого схемотехнічного рішення порівняно з альтернативними варіантами. У запропонованому схемотехнічному рішенні ємнісний струм ТРК, який плавно регулюється в заданих межах зміною кута управління тиристорами, компенсує реактивну складову пускового струму АД, що призводить до зменшення рівня навантаження електричної мережі. У момент запуску АД ТРК зменшує на 40 % ударне значення пускового струму АД та за декілька періодів після ударного більш ніж на 50 % – квазісталого пускового струму. Це суттєво для покращення керування режимами електричної мережі, оскільки для АД тривалість квазісталого пускового струму є досить значною, зокрема, для АД потужністю 110 кВт вона складає до 0,4 с.

Для ефективної реалізації запропонованого підходу необхідно розв'язати задачу вибору та розрахунку оптимального складу фільтрів вищих гармонік (ФВГ). У процесі регулювання ТРК створює в електричній мережі вищі гармоніки струму зі значеннями амплітуд, прямо пропорційними потужності ТРК. Один зі способів забезпечення належної електромаг-

нітної сумісності ТРК з електричною мережею та підтримки якості струму у відповідності до міжнародних стандартів полягає у встановленні між пристроєм та електричною мережею комплексу ФВГ. Для вирішення задачі фільтрації вищих гармонік застосовують пасивні фільтри, особливістю яких є генерування ємнісної реактивної потужності [2–4].

Більш ефективний спосіб вирішення проблеми – доповнення схеми ТРК силовою косинусною конденсаторною батареєю (CB). Відповідно до наведеної на рис. 1 схеми частину реактивної потужності генерує CB. У такому разі CB відфільтровує вищі гармоніки, що дає змогу суттєво зменшити вимоги до потужності ФВГ чи взагалі відмовитись від засобів фільтрування вищих гармонік.

На рис. 1 зображено: Tr – погоджувальний трансформатор; CB – силова конденсаторна батарея; C_{Δ} – ємність конденсатора в стороні трикутника CB; B – тиристорно-діодний міст; T1–T6 – тиристори; D1–D6 – відсічні діоди; C – комутаційні конденсатори ємністю C; L_d – дросель у колі випрямленого струму моста з індуктивністю L_d і активним опором r_d .

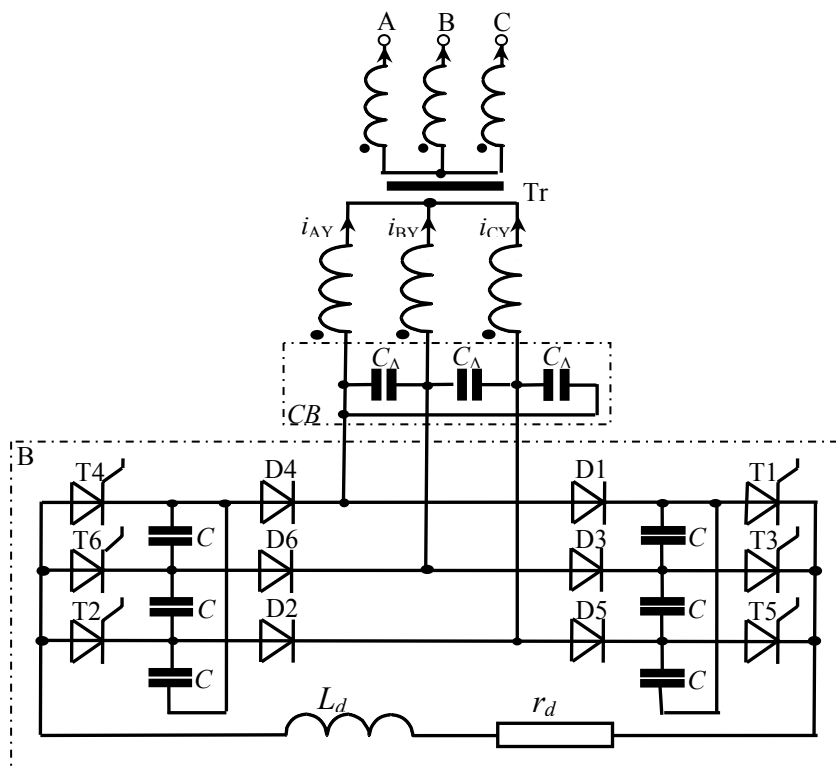


Рис. 1

Використані в наведеній схемі тиристори здатні короткочасно витримувати значні (до 10-ти разів) перенавантаження. Тому в межах допустимого часу $t_{\text{доп}}$, регламентованого виробниками, реактивна складова ударного пускового струму АД проходить через тиристори без шкоди для пристрою, а в подальшому ТРК функціонує в штатному режимі з номінальними для тиристорів струмами.

У свою чергу CB генерує частину необхідної реактивної потужності (позначимо її через Q_{CB}) без спотворень форми вхідного струму. Таким чином, у цій модифікації ТРК реактивна потужність Q_B , яка генерується безпосередньо тиристорно-діодним мостом B, може бути зменшена до величини, яка визначається співвідношенням $Q_B = Q_{\text{ТРК}} - Q_{CB}$, де $Q_{\text{ТРК}}$ – реактивна потужність на первинній обмотці Tr, тобто всього ТРК у цілому. Вочевидь у такому разі зменшуються й амплітуди вищих гармонік, які ТРК генерує в мережу, що послаблює негативний вплив пристрою на якість електроенергії. Крім того, конденсаторна батарея CB значної ємності завдяки фільтрувальним властивостям додатково відфільтровує суттєву частину вищих гармонік струму. Тому, за умови оптимального вибору ємності CB, є змога суттєво зменшити необхідну потужність ФВГ і в окремих випадках взагалі відмовитися від засобів фільтрації.

Мета роботи: дослідити показники перехідного процесу в мережі з встановленим у ній модифікованим ТРК, який виникає під час запуску асинхронного двигуна зіставної з мережею потужності з метою оцінки ефективності запропонованого схемотехнічного рішення.

Для вирішення поставленої мети в середовищі MATLAB R2014a Simulink було створено модель і програму розрахунку перехідних електромагнітних процесів у електричній мережі з напівпровідниковим регулятором. Електрична мережа в цій моделі подається джерелом живлення, представленим на схемі емулятором EPS і комбінованим споживачем із ста-

тистими параметрами. Для моделювання процесу запуску асинхронного двигуна використано модель, що враховує динаміку механічної частоти, моменту та струму. Для моделювання процесу запуску асинхронного двигуна використано модель, що враховує динаміку механічної частоти, моменту та струму.

тичним $r_n - L_n$ та електромеханічним навантаженням з близьким до граничної потужності мережі значенням. Структуру моделі електричної мережі з напівпровідниковим регулятором та електромеханічним навантаженням наведено на схемі рис. 2.

На рис. 2 ЕРС – трифазна система електрорушійних сил на вході електричної мережі з діючим значенням $E = 220$ В і частотою $f = 50$ Гц. Лінія електропередачі ЛЕП подана параметрами $z_{\text{мер}} = z_{\text{ЛЕП+ТРМ}} = 0,0696$ Ом, $x_{\text{ЛЕП+ТРМ}} = \omega L_{\text{ЛЕП+ТРМ}} = 0,0674$ Ом ($\omega = 2\pi f$), $r_{\text{ЛЕП+ТРМ}} = 0,0172$ Ом. Окрім

параметрів схеми заміщення ЛЕП, цим елементом враховується розподільний трансформатор мережі (ТРМ) потужністю 250 МВА, 110/0,4 кВ, $u_{\text{кз}} = 0,06$, $P_{\text{кз}} = 3,7$ кВт. Потужність короткого замикання мережі в точці загального приєднання задана значенням $S_{\text{меркз}} = 2,0715$ МВА.

Активно-індуктивне навантаження мережі Н моделюється трифазною симетричною групою «зірка» з поданням кожної фази активним опором $r_n = 1,21$ Ом та реактивним опором $x_n = \omega L_n = 1,61$ Ом ($L_n = 5,1$ мГн) потужності навантаження $S_n = 150$ кВА з активною складовою $P_n = 120$ кВт та реактивною складовою $Q_n = 90$ кВАр. Тут і далі реактивні потужності елементів системи рис. 2 розглядаються виключно на основній (першій) гармоніці, тобто на частоті живлячої мережі. Електромеханічна складова вузлового комплексного навантаження мережі подається в моделі асинхронною машиною АД потужністю 110 кВт (номінальний струм $I_{\text{АМН}} = 205,8$ А, $\cos\phi = 0,89$, $\eta = 0,91$).

Пристрій ТРК моделюється наведеною на рис. 1 схемою, де ємність комутаційних конденсаторів $C = 10$ мкФ. Дросель у колах випрямленого струму має індуктивність $L_d = 9,4$ мГн, а його активний опір $r_d = 0,0016$ Ом.

Активні опори відкритих вентилів є такими: для тиристорів $r_T = 1 \cdot 10^{-4}$ Ом та діодів $r_D = 1 \cdot 10^{-4}$ Ом. Коефіцієнт трансформації погоджувального трансформатора Тг приймаємо $n_{Tr} = 1$.

У розрахунковій схемі також враховано пускач АД (П на рис. 2), який підключає АД до мережі в момент $t_{\text{АМ}} = 0,14$ с від нуля поточної часової координати t , та початкове значення електромагнітного моменту (ПЕМ на рис. 2).

Математичну модель АД у перехідному (пусковому) режимі складено за методикою, викладеною в роботі [5]. Перехідний процес завершується, коли АД набирає номінальних обертів. У розрахунковій моделі цей момент фіксується за допомогою вимірювача швидкості ВШ. У цьому разі початкове значення електромагнітного моменту задається в блоці ПЕМ.

За відсутності ФВГ належна якість вхідного струму ТРК досягається за допомогою великих значень ємності C_{Δ} . Конденсаторна батарея СВ має два ступені (секції) $C_{\Delta} = C_{\Delta 1} + C_{\Delta 2}$. Перший ступінь постійно підключений до мережі та має ємність $C_{\Delta 1} = 400$ мкФ, необхідну для компенсації реактивної потужності в мережі за сталого режиму живлення виключно тільки $r_n - L_n$ навантаження (надалі – сталий режим № 1). Другий ступінь з ємністю $C_{\Delta 2} = 2600$ мкФ підключається до мережі лише в момент запуску АД $t = t_{\text{АМ}} - 0,001$ с та відключається від неї (повністю чи частково) після закінчення перехідного процесу, тобто при вході моделі в сталий режим з номінальними обертами валу АД і номінальним його струмом (далі – сталий режим № 2).

У момент часу $t_{\text{форТРК}} = 0,1$ с у моделі здійснюється форсована (стрибокподібна) зміна кута управління тиристорами ТРК α (кут α відміряється від точок перетину синусоїд ЕРС)

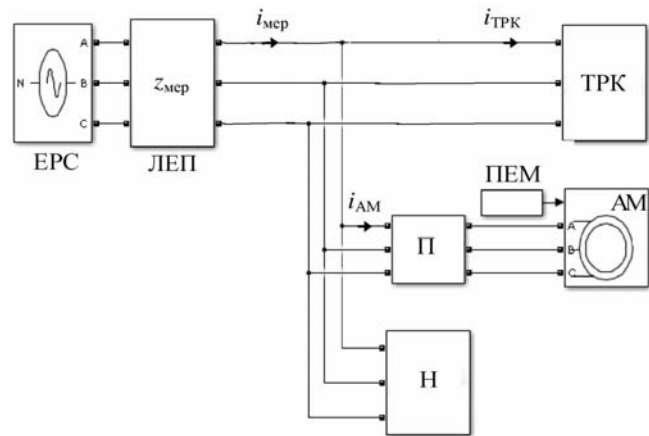


Рис. 2

до максимального доцільного його значення $\alpha_{\text{фор}} = -83$ ел.град з метою форсованого збільшення величини ємнісного струму ТРК з упередженням запуску АД (тобто $t_{\text{форТРК}} < t_{\text{АМ}}$). Упереджене форсування потужності ТРК реалізовано з метою максимальної компенсації реактивної складової ударного значення пускового струму АД. Дійсно, у колі ТРК ємнісний струм наростає не миттєво, а з деякою сталою часу $\tau_{\text{ТРК}}$, яка визначається параметрами кола ТРК: $\tau_{\text{ТРК}} = L_{\text{еквТРК}} / r_{\text{еквТРК}} \approx \tau_d = L_d / r_d$, де $L_{\text{еквТРК}}$ – еквівалентна індуктивність кола ТРК, а $r_{\text{еквТРК}}$ – еквівалентний активний опір кола ТРК.

Величина параметра τ_d визначає вибір різниці $\Delta t_{\text{фор}} = t_{\text{АМ}} - t_{\text{форТРК}}$, яка, у свою чергу, безпосередньо впливає на величину, до якої в моделі рис. 2 встигає зрости ємнісний струм ТРК від моменту $t_{\text{форТРК}}$ до моменту $t_{\text{АМ}}$. Таким чином, значення $\Delta t_{\text{фор}}$ визначає рівень компенсації ємнісним струмом ТРК у момент $t_{\text{АМ}}$ індуктивної складової ударного пускового струму. У розрахунках прийнято $\Delta t_{\text{фор}} = 0,14 - 0,1 = 0,04$ с.

На інтервалі $0 \leq t \leq t_{\text{форТРК}}$ має місце сталий режим № 1 електричної мережі, коли на-

вантаження H визначається виключно складовою $r_H - L_H$. На інтервалі $0 \leq t \leq t_{\text{форТРК}}$ повна компенсація реактивної потужності, яка споживається навантаженням H , досягається відповідним підбором значень ємності $C_{\Delta 1}$ у стороні трикутника конденсаторної батареї CB та відповідного цьому режиму значення кута управління $\alpha = \alpha_{\text{стал1}} = -94,3$ ел.град.

На інтервалі $t_{\text{форТРК}} \leq t \leq t_{\text{АМ}}$ відбувається збільшення потужності ТРК від потужності за сталою режиму № 1 до максимальної, яку він за обраних параметрів елементів може досягти до моменту $t_{\text{АМ}}$ запуску АД.

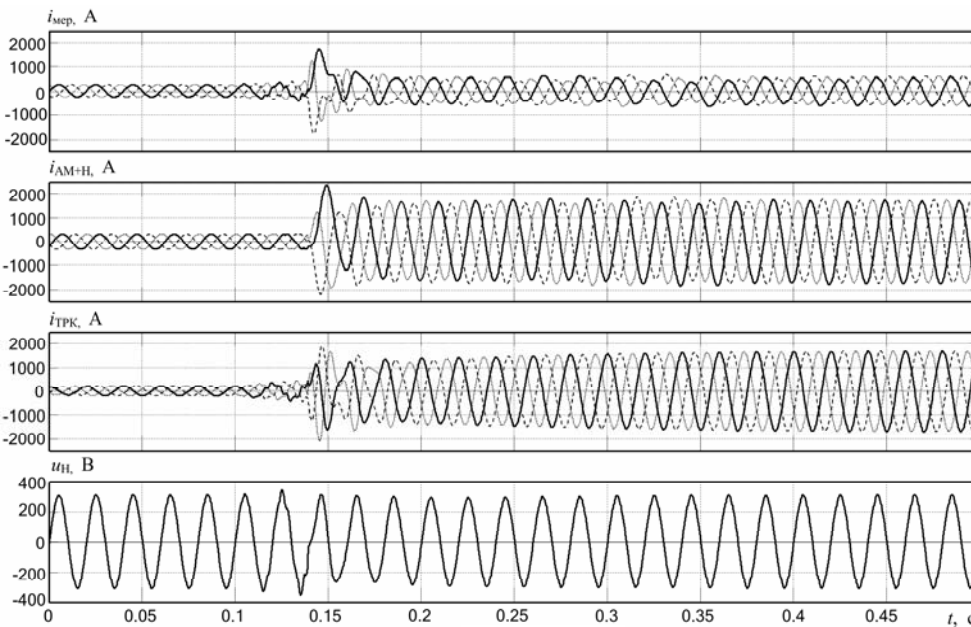


Рис. 3

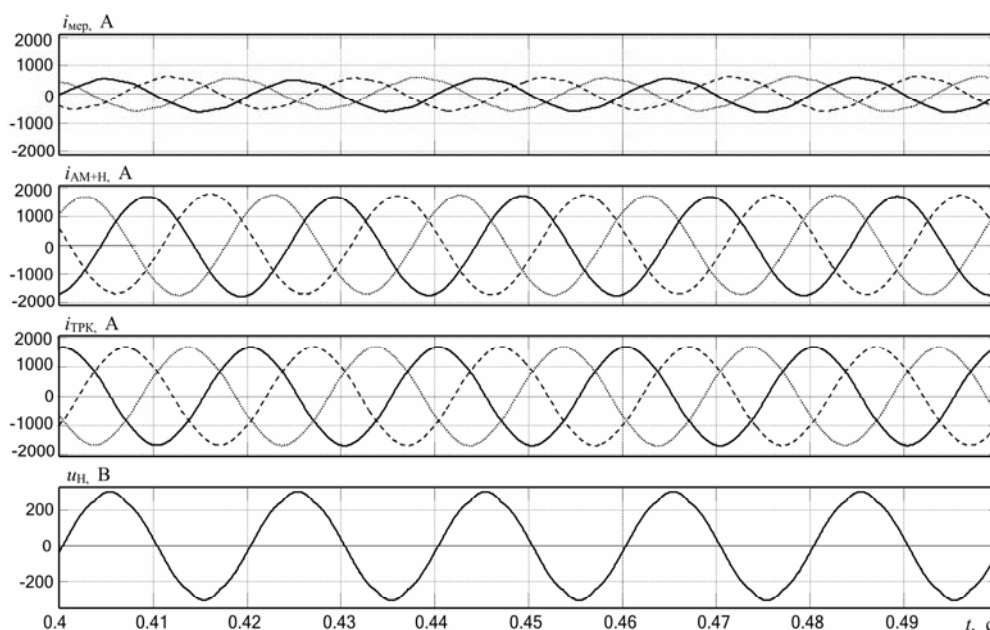


Рис. 4

У той же час чисельне значення різниці $\Delta t_{\text{фор}}$ обмежується з метою недопущення в електричній мережі надструмів, які можуть виникнути внаслідок форсованого збільшення реактивної потужності ТРК. Тому оптимальний вибір параметра $\Delta t_{\text{фор}}$ суттєво впливає на режими електричної мережі і повинен розглядатись як окрема задача.

На рис. 3 наведено побудовані часові діаграми струмів ($i_{\text{мер}}, i_{\text{АМ+Н}}, i_{\text{ТРК}}$) і напруги ($u_{\text{Н}}$), які відображають перехідний режим у мережі внаслідок запуску АД, де $i_{\text{мер}}$ – миттєве значення фазного струму мережі в точці підключення Н, АД, ТРК і СВ (струм фази А – жирна неперервна лінія, інші фази – розривні лінії); $i_{\text{АМ+Н}} = i_{\text{АМ}} + i_{\text{Н}}$, де $i_{\text{АМ}}$ – миттєве значення пускового фазного струму АД, $i_{\text{Н}}$ – миттєве значення фазного струму навантаженням Н (таким чином, $i_{\text{АД+Н}}$ – сумарний фазний струм вузлового комплексного навантаження (ВКН) мережі: для фази А – жирна неперервна лінія, для інших фаз – розривні лінії); $i_{\text{ТРК}} = i_{\text{Bridg}} + i_{\text{СД}}$, де i_{Bridg} – миттєве значення фазного струму на виході тиристорно-діодного мосту, $i_{\text{СД}}$ – миттєве значення фазного струму конденсаторної батареї СВ, $i_{\text{ТРК}}$ – миттєве значення фазного струму на вході моделі ТРК: для фази А – жирна неперервна лінія, для інших фаз – розривні лінії; $u_{\text{Н}}$ – миттєве значення фазної напруги (фази А) в точці підключення до мережі вузлового комплексного навантаження.

На рис. 4 деталізовано останні п'ять періодів наведеної на рис. 3 діаграми, які ілюструють зміну перехідних струмів $i_{\text{мер}}, i_{\text{АМ+Н}}, i_{\text{ТРК}}$ та напруги $u_{\text{Н}}$ в умовах квазісталого режиму перехідного процесу. Видно, що квазісталий режим характеризується відносно незначними змінами амплітуд перехідних струмів і напруги, які в такому режимі можна вважати умовно сталими і розраховувати визначені виключно для сталих періодичних режимів умовні діючі значення, умовні амплітуди гармонічних складових (тобто їх умовний гармонічний склад), умовні потужності та умовні коефіцієнти спотворення і гармонік.

За результатами розрахунків визначено найбільш важливі характеристики перехідного режиму електричної мережі в разі пуску від неї АД потужністю 110 кВт:

– максимальне ударне значення струму ВКН внаслідок пуску АД (має місце у фазі А при значенні поточної часової координати $t = t_{\text{уд}} = 0,1491$ с): $i_{\text{АМ+Н уд}} = 2360$ А;

– значення миттєвого струму ТРК у фазі А в момент $t = t_{\text{уд}} = 0,1491$ с: $i_{\text{ТРК уд}} = 1561$ А;

– максимальне значення струму мережі в режимі запуску АД (має місце у фазі А при значенні поточної часової координати $t = t_{\text{мер max}} = 0,1451$ с): $i_{\text{мер max}} = 1760$ А;

– значення миттєвого струму ТРК у фазі А при $t = t_{\text{мер max}} = 0,1451$ с: $i_{\text{ТРК}}(0,1451) = 770$ А;

– значення миттєвого струму ТРК у фазі А в момент $t = t_{\text{фор ТРК}} = 0,1$ с: $i_{\text{ТРК}}(0,1) = 190$ А;

– мінімальне значення амплітуди $U_{\text{мн}}$ фазної напруги $u_{\text{Н}}$ (у фазі А в момент часу $t = t_{U_{\text{мн min}}} = 0,2052$ с) у режимі запуску АД: $U_{\text{мн min}} = 290$ В;

– максимальне значення просідання амплітуди фазної напруги $u_{\text{Н}}$: $\Delta U_{\text{мн max}} = \sqrt{2} \cdot 220$ В – -290 В = 21 В, тобто $\Delta U_{\text{мн max}}\% = 6,75$ % від $U_{\text{мн ст}} = \sqrt{2} \cdot 220$ В (сталого режиму);

– довжина інтервалу просідання (в межах від 1,5 до 6,75 %) амплітуди напруги $u_{\text{Н}}$: $\Delta_{\text{прос}} = 0,25$ с, тобто складає 12,5 періоду напруги електричної мережі;

– максимальне збільшення амплітуди фазної напруги $u_{\text{Н}}$ у режимі запуску АД: $U_{\text{мн max}} = 350$ В – $\sqrt{2} \cdot 220$ В = 39 В, тобто $U_{\text{мн max}}\% = 12,5$ %, від $U_{\text{мн ст}} = \sqrt{2} \cdot 220$ В;

– довжина інтервалу, на якому спостерігається перевищення амплітуди номінального значення напруги: $\Delta_{\text{переб}} = 0,011$ с, тобто приблизно 0,5 періоду.

Через деякий час після ударного пускового струму встановлюється так званий квазісталий режим пускових струмів на час 0,35 с (тобто $\Delta_{\text{квазі}} = 0,35$ с) для АД потужністю 110 кВт.

У цьому режимі амплітуда пускового струму $I_{mAM+Hквazi}$ коливається у вузьких межах. Якщо для струму i_{AD+H} прийняти величину таких коливань $\Delta I_{mAM+Hквazi} = I_{mAM+Hmaxквazi} - I_{mAM+Hminквazi} = 200$ А (різниця між найбільшою та найменшою амплітудами пускового струму в квазісталому режимі), то квазісталий режим (див. рис. 3) починається в момент $t = t_{квazi} = 0,1892$ с при значеннях струму 1600 А. Середнє значення амплітуди квазісталого струму в разі таких припущень становить $I_{mAM+Hквazi\ сер} = 1675$ А, тобто $I_{mAM+Hквazi} = 1675 \pm 100$ А. За цих обставин максимальне значення амплітуди квазісталого струму в електричній мережі становить $I_{m\ мер\ квazi\ max} \approx 660$ А.

Наступний часовий проміжок перехідного процесу характеризується затуханнями коливань амплітуд квазісталих струму $\Delta I_{mквazi}$ та напруги $\Delta U_{mнквazi}$ (рис. 4).

На діаграмі рис. 3 значення амплітуди струму ТРК $I_{mТРК}$ збільшується експоненціально і в момент $t = t_{ТРК\ max} = 0,46$ с досягає свого максимального значення $I_{mТРК\ max} = 1684$ А. Величина $I_{mТРК}$ може зростати і далі за умови, що кут управління α відмірюється від перетину синусоїд напруги фаз мережі в точці приєднання ВКН (тобто Н, АД і ТРК). Проте значення кута α в розрахунковій моделі вимірюється від перетину синусоїд ЕРС на вході мережі. Тому, внаслідок зростання струму та спричиненого цим падіння напруги на опорах мережі, фазні напруги мережі в точці підключення ВКН зміщуються за фазою відносно відповідних фазних ЕРС на вході мережі. Таким чином, належні кути α , вимірювані від відповідних перетинів напруги u_n (фаз А, В і С), зменшуються, що призводить до зменшення величини $I_{mТРК}$ при $t > t_{ТРК\ max}$. Такий своєрідний зворотній зв'язок в розрахунках перехідних процесів у електричній мережі дав змогу уникнути потреби в зменшенні кутів управління α у разі зменшення величини $I_{mAM+Hквazi\ сер}$. За необхідності моделювання перехідних процесів у часових інтервалах $t > 0,5$ с значення кутів управління α необхідно відповідно скоригувати. На рис. 4 видно, що наприкінці квазісталого режиму перша гармоніка струму мережі $i_{(1)\ мер}$ практично співпадає за фазою з напругою u_n (точніше, з її першою гармонікою $u_{(1)н}$ – з огляду на практично абсолютну симетрію кривої u_n (див. останню діаграму рис. 4), u_n та $u_{(1)н}$ повністю співпадають за фазами), тобто струм $i_{\ мер}$ – є суто активним. Це свідчить про те, що ТРК повністю компенсував у мережі як реактивну складову $i_{(1)рAM}$ першої гармоніки пускового струму АД, так і реактивну складову $i_{(1)рH}$ першої гармоніки струму навантаження Н, тобто для діаграм рис. 4 виконується $i_{(1)рТРК} \approx i_{(1)рAM} + i_{(1)рH}$.

Для оцінки якості струму $i_{\ мер}$ та напруги електричної мережі в точці підключення навантаження u_n для п'яти періодів (рис. 4) розрахуємо умовні інтегральні характеристики, а саме умовні коефіцієнти спотворення струму $v_{iуm}$ і напруги $v_{uуm}$ та умовні коефіцієнти гармонік струму $K_{Giуm}$ і напруги $K_{Guуm}$. Нижній індекс «ум» у позначеннях коефіцієнтів вказує на те, що ці величини – умовні, тобто визначаються не для сталих струмів і напруги, а для квазісталих. Отже, маємо: $v_{iуm} = 0,9995$, $v_{uуm} = 0,9998$, $K_{Giуm} = 3,5$ %, $K_{Guуm} = 2,17$ % при $0,4\ с \leq t \leq 0,5\ с$.

Таким чином, на інтервалі $0,4\ с \leq t \leq 0,5\ с$ така характеристика якості електроенергії, як сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги, задовольняє міжнародний стандарт якості електроенергії [6], який для електричної мережі 0,38 кВ складає 8 %.

З розрахунків і діаграм рис. 3 випливає, що використання в мережі ТРК за схемою рис. 1 дає змогу зменшити в разі запуску АД:

1) ударне значення надструму з 2360 А (яке має місце за відсутності в мережі ТРК) до значення 1760 А (яке він приймає в моделі рис. 2 у разі наявності в мережі ТРК), тобто в $K_{уд} = i_{AM+N уд} / i_{мер max} = 2360 А / 1760 А = 1,34$ раза, чи (що теж саме) зменшити на $\Delta_{уд} = ((K_{уд} - 1) / K_{уд}) \times 100 \% = 25,34 \% ;$

2) значення квазісталоного струму – у $K_{квазі} = I_{m AM+N max квазі} / I_{m мер квазі max} = 1775 А / 660 А = 2,69$ раза, тобто зменшити на $\Delta_{квазі} = ((K_{квазі} - 1) / K_{квазі}) 100 \% = 62,8 \% .$

За такої умови враховується, що за відсутності в моделі рис. 2 ТРК $i_{мер max} = i_{AM+N уд}$ та $i_{мер квазі} = i_{AM+N квазі} .$

Розглянемо вимоги до швидкодії тиристорів, дотримання яких забезпечить ефективну реалізацію наведеного в статті рішення. На часовій діаграмі напруги (рис. 5) на замкненому тиристорі Т1 показано, що довжина ділянки замкнення тиристора за напругою становить $\Delta_{від}^0 = 16,7$ мкс. Таким чином, у ТРК мають застосовуватись швидкодіючі тиристори з $\tau_q < 16,7$ мкс чи $\tau_q < 8,35$ мкс (з подвійним запасом). Наведені вимоги задовольняють, наприклад, тиристори 5STF06D1408.

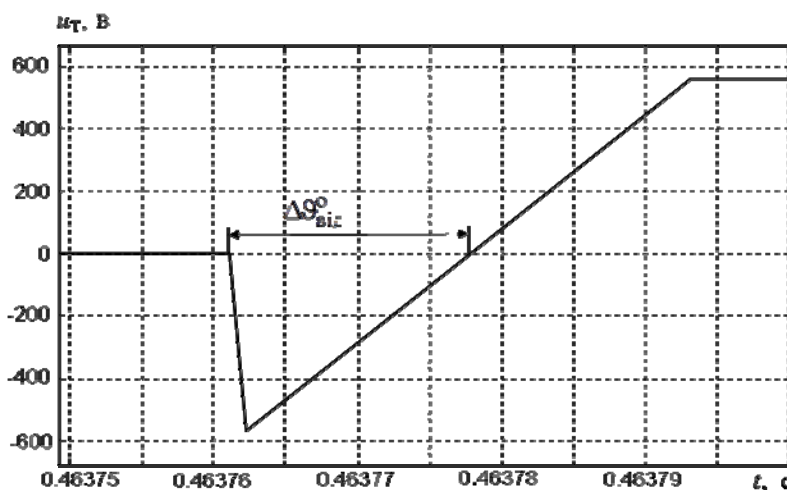


Рис. 5

Висновки. Виконані з використанням складеної моделі й розробленої програми розрахунків дослідження довели можливість ефективного застосування в електричній мережі з електромеханічним навантаженням запропонованого схмотехнічного рішення напівпровідникового регулятора на базі модифікованого ТРК для полегшення важких перехідних процесів у мережі в разі запуску АД з'їзвальної з електричною мережею потужності. Запропонований ТРК покращує керування режимами електричної мережі обмеженої потужності при роботі з асинхронними двигунами (АД), зокрема в електричній мережі в перехідному режимі суттєво зменшується просідання напруги, а інтервал цього просідання скорочується.

Показано, що такий ТРК здатний повністю компенсувати реактивні складові як пускового струму АД, так одночасно і струму статичного навантаження, тим самим розвантажуючи від них мережу без потреби у використанні фільтрів вищих гармонік. Принципова відмінність запропонованої моделі ТРК від аналогічних схмотехнічних рішень полягає в компенсації реактивної складової струму АД як у сталому, так і в перехідному режимах. У результаті в квазісталому пусковому режимі досягається зменшення струму електричної мережі в 2,7 раза. Ударне значення пускового струму зменшується в 1,34 раза.

Запропоноване модифіковане (з СВ) схмотехнічне рішення напівпровідникового регулятора (на базі ТРК) за виконання своїх основних функцій – обмеження перехідних струмів у мережі й просідання напруги в точці підключення навантаження – також забезпечує належну електромагнітну сумісність цього ТРК з електричною мережею, внаслідок чого показники якості електроенергії, що передається мережею, задовольняють норми, регламентовані міжнародними стандартами.

Фінансується за цільовою програмою наукових досліджень НАН України «Напівпровідникові матеріали, технології і датчики для технічних систем діагностики, контролю та управління», науковий проект «Створення системи контролю та керування режимами електричних мереж при комутації потужного електромеханічного навантаження», 1 етап 2019 рік: «Визначення вимог, моделювання та розроблення технічного рішення напівпровідникового регулятора для системи керування режимами мережі», шифр № ТД29-

362/19. Виконується за розпорядженням Президії НАН України від 14.02.2019 р., протокол № 88. Державний реєстраційний номер 0119U001469.

1. Чиженко О.І., Трач І.В. Коригування режиму слабкої електричної мережі при запуску від неї електродвигуна зіставної потужності. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2017. Вип. 48. С. 27–32.
2. Czarnecki L.S. Common and Fixed-Poles Resonant Harmonic Filters. *Europ. Trans. On Electrica Power*, ETEP. V. 8. No 5, Sept./Oct. 1998. Pp. 345–351.
3. Na He, Dianguo Xu. The Application of Particle Swarm Optimization to Passive and Hybrid Active Power Filter Design. *IEEE transaction on industrial electronics*. 2009. V. 56. No 8.
4. Mishra G. Design of Passive High Pass Filter for Hybrid Active Power Filter Applications A Thesis of the Degree of Master of Technology. National Institute of Technology. Rourkela. 2013. 72 p.
5. Бібік О.В., Попович О.М., Шевчук С.П. Енергоефективні режими електромеханічної системи насосної установки багатоповерхового будинку. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 5. С. 38–45.
6. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. Київ. Мінекономрозвитку. 2014.

УДК 621.316

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ РЕГУЛЯТОР ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМАМИ СЕТИ ПРИ ПРЯМОМ ПУСКЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ СОПОСТАВИМОЙ МОЩНОСТИ

А.И. Чиженко, докт. техн. наук, **О.Б. Рыбина**, канд. техн. наук, **И.В. Трач**, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

Рассмотрена модификация схемотехнического решения полупроводникового регулятора на базе тиристорного регулируемого компенсатора, предназначенного для корректировки переходных процессов в электрической сети, которые возникают в результате запуска асинхронных двигателей сопоставимой с сетью мощности. Приведена математическая модель для расчета электромагнитных переходных процессов, использование которой позволяет оценить эффективность разработанных устройств в распределительных электрических сетях. Показано улучшение управления режимами электрической сети. Предложенная схема тиристорного регулируемого компенсатора в своем составе имеет косинусные конденсаторные батареи и не использует пассивные фильтры высших гармоник токов. Библи. 6, рис. 5.

Ключевые слова: электрическая сеть, переходный процесс, пусковые токи, прямой пуск асинхронного двигателя, тиристорный регулируемый компенсатор, качество электроэнергии.

SEMICONDUCTIVE REGULATOR FOR MANAGING THE NETWORK MODES RUNNING IN DIRECT START OF THE ASYNCHRONAL MACHINE OF THE COMPARABLE CAPACITY

O.I. Chyzenko, O.B. Rybina, I.V. Trach

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

The modification of the circuit-technical solution of the semiconductor regulator based on the thyristor compensator of reactive power intended for managing of the transient processes in the electric network, which arise as a result of the start of asynchronous motors of the comparable power, is considered. The mathematical model for calculation of electromagnetic transients is presented, the use of which allows to estimate the efficiency of developed devices in distribution electrical networks. The improvement of the control of the electric network modes is shown. The proposed scheme of the TRC in its composition has a cosine condenser battery and does not use passive filters of higher harmonics of currents. References 6, figures 5.

Key words: electric network, thyristor compensator of reactive power, cosine condenser battery, start the electric motor, asynchronous motors of the comparable power.

1. Chyzenko A.I., Trach I.V. Correction of the regime of a weak electric network when starting the electric motor with comparable power. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2017. V. 48. Pp. 27–32.
2. Czarnecki L.S. Common and Fixed-Poles Resonant Harmonic Filters. *Europ. Trans. On Electrica Power*, ETEP. V. 8. No 5. Sept.-Oct. 1998. Pp. 345–351.
3. Na He, Dianguo Xu, The Application of Particle Swarm Optimization to Passive and Hybrid Active Power Filter Design. *IEEE transaction on industrial electronics*. 2009. V. 56. No 8.
4. Mishra G. Design of Passive High Pass Filter for Hybrid Active Power Filter Applications A Thesis of the Degree of Master of Technology. National Institute of Technology. Rourkela. 2013. 72 p.
5. Bibik O.V., Popovych O.M., Shevchuk S.P. Power Effective Modes Electromechanical System of Pump Insalation of the Multistorey Building. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 5. Pp. 38–45.
6. National Standards of Ukraine EN 50160:2014. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks. Kyiv. Ministry of economy development. 2014.

Надійшла 18.07.2019

Received 18.07.2019