

Корисна модель належить до галузі електроенергетики та призначена для регулювання активної або реактивної потужності навантажень на виході трансформатора, який живить електричну мережу, з використанням активної або реактивної потужності генератора, приєднаного до електричної мережі. Одночасно пристрій може регулювати або активну, або реактивну потужність. Пристрій може застосовуватись в мікромережі (ММ) низької напруги (НН), приєднаній до розподільчої мережі середньої напруги (СН).

В електричних мережах актуальною є проблема регулювання потужності. В результаті протікання активної або реактивної потужності в мережі виникають втрати, що призводить до погіршення рівнів напруги, збільшення загальної потужності в кабелях та в розподільному трансформаторі. При цьому перевантажуються електричні мережі більш високого рівня. Для регулювання потужності мережі при коливанні потужності навантажень використовуються генератори потужності, встановлені в електричній мережі. Зокрема, до генераторів належать інвертори сонячних станцій та акумуляторних установок. Також проблемою у галузі регулювання швидкозмінної потужності навантажень є регулювання потужності на виході електричної мережі, яка приєднана до розподільного трансформатора. Є електричні мережі, в яких постійно присутні (або іноді виникають) високочастотні складові потужності споживання, пов'язані зі складовою швидкозмінної потужності навантаження. Такі навантаження належать до класу швидкозмінних навантажень (fast-varying load). Зокрема, це відбувається в електричних мережах низької напруги з обмеженою кількістю навантажень. Наприклад в електричних мережах низької напруги з кількома приватними будинками. У цьому випадку відсутнє згладжування потужності навантаження, як це має місце у разі великої кількості споживачів.

Як пристрій регулювання наразі використовують пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) регулятор та його модернізовані варіанти.

ПІД регулятор з фільтрами запропоновано в [1]. Пристрій складається з регулятора у складі стандартного ПІД, посилювача та гілки зворотного негативного зв'язку, який складається з послідовно приєднаних посилювача та елемента похідної. Технічне рішення має за мету пригнічувати високі частоти.

Пристрій працює наступним чином. Сигнал обробляється ПІД регулятором, посилюється посилювачем. З виходу посилювача по гілці зворотного одиничного негативного зв'язку сигнал обробляється другим підсилювачем та елементом похідної.

Недоліком пристрою є обмежене використання, оскільки фільтром низьких частот придушуються складові сигналів з високою частотою. Це призводить до малої ефективності у випадку, коли відслідковуються сигнали з високочастотною складовою. Цифрова реалізація використовує лише 3 попередні вхідні сигнали. Іншим недоліком є те, що знаменник передавальної функції ПІД регулятора має незмінний вигляд $az = [1, 0, -1]$, а також неможливо використовувати більш широкий діапазон трьох змінних знаменника i , відповідно, оптимізація параметрів регулятора обмежена.

Групу паралельних ПІ, ПД, ПІД представлено в [2]. Пристрій складається з групи ПІ, ПД, ПІД регуляторів та перемикача режимів регулювання. Технічне рішення має за мету переключати регулятори відповідно до вхідного сигналу, а саме потужністю генератора. Передавальна функція цього ПІД регулятора

$$G_{pid_s}(s) = K_P + \frac{K_P}{K_I \cdot s} + K_P \cdot K_D \cdot s$$

Цифрова білінійна апроксимація ПІД-регулятора

$$G_{pid_z}(z) = \text{tf}\left(\frac{bz}{az}\right),$$

де

$$bz = \left[\left(K_P + \frac{K_I T_s}{2} + \frac{2K_D}{T_s} \right), \left(K_I T_s - \frac{4K_D}{T_s} \right), \left(-K_P + \frac{K_I T_s}{2} + \frac{2K_D}{T_s} \right) \right]$$

$$az = [1, 0, -1]$$

Недоліком є те, що цифрова білінійна реалізація ПІД-регулятора використовує тільки 2 попередні вхідні сигнали. Іншим недоліком є те, що знаменник передавальної функції ПІД регулятора має незмінний вигляд $az = [1, 0, -1]$, що призводить до критичної стабільності системи регулювання тому що полюс дорівнює одиниці $\max(\text{abs}(\text{pole}))=1$. Відповідно, оптимізація параметрів регулятора при незмінних параметрах az стикається з цим обмеженнями. Вказана система регулювання може використовуватись лише з обмеженими перевіреними видами сигналів, які не призводять до значних похибок.

Інший пристрій модернізованого ПІД регулятора [3] має в гілці похідної послідовно приєднаний фільтр нижніх частот. Передавальна функція цього ПІД регулятора

$$L(s) = K \frac{W}{s + W},$$

$$C(s) = P + \frac{P}{I \cdot s} + P \cdot D \cdot s \cdot L(s) = P + \frac{P}{I \cdot s} + (P \cdot D \cdot s) \cdot \frac{W}{s + W}.$$

Пристрій працює наступним чином. Вхідний сигнал обробляється модернізованим ПІД регулятором з фільтром низьких частот у гілці похідної. У разі появи високих частот вони придушуються фільтром низьких частот.

Цей варіант фільтра уникає критичних полюсів та має стабільність. Використання фільтра низьких частот змінює структуру передавальної функції так, що система стабільна оскільки має полюси менші за одиницю $\max(\text{abs}(\text{poles})) < 1$.

До недоліків цього варіанта регулятора слід віднести використання лише 3 попередніх вхідних сигналів.

Загальним недоліком перерахованих регуляторів є використання від 2 до 3 попередніх вхідних сигналів.

Тому розробка пристрою регулювання активної або реактивної потужності в електричній мережі зі швидкозмінною потужністю навантажень і які відрізнялися б від альтернативних кращими техніко-економічними показниками є актуальною проблемою.

Найближчим аналогом вибрано регулятор зі зворотнім негативним одиничним зв'язком [4], в якому послідовно з'єднані два ПІД регулятори, причому у другому ПІД регуляторі до диференційного елемента послідовно приєднано фільтр низьких частот. Вихід другого ПІД регулятора приєднано до входу об'єкта управління, вихід якого через від'ємний одиничний зворотній зв'язок приєднано до входу першого ПІД регулятора.

Пристрій працює наступним чином. Сигнал з виходу об'єкта управління надходить на негативний вхід блока розрахунку різниці сигналів, а на другий вхід надходить опорний сигнал. З виходу блока розрахунку різниці сигналів сигнал помилки надходить на вхід першого ПІД регулятора, далі надходить на другий ПІД регулятор, де фільтр низьких частот гілки похідної придушує високі частоти сигналу. Далі сигнал надходить на вхід об'єкта управління.

Головним недоліком найближчого аналога є наступне: система має критичну стабільність у зв'язку з тим, що полюс дорівнює одиниці $\max(\text{abs}(\text{poles})) = 1$. Це пов'язано з властивостями першого ПІД регулятора та його критичним полюсом тому, що у першому ПІД регуляторі передавальна функція має жорстко незмінне значення знаменника $az = [1, 0, -1]$. Це призводить до обмеження вибору параметрів регулятора при оптимізації та до критичної стійкості. Відповідно, система може працювати лише з обмеженими видами вхідних сигналів, є вірогідність виникнення великих помилок у разі появи непередбачених видів сигналів.

В основу корисної моделі поставлена задача створення такого пристрою з регулювання потужності в електричній мережі, в якому за рахунок збільшення попередніх вхідних сигналів до 4 на вході фільтра з нескінченною імпульсною характеристикою четвертого порядку, а також та використання обмежувача амплітуди досягається новий технічний результат: зменшення помилки регулювання потужності, покращення ефективності компенсації потужності споживання. Пристрій є більш універсальним, а саме підвищує стійкість. У пристрої не виникають резонансні явища у разі появи непередбачених видів сигналів, значно краще враховуються властивості потужності навантажень.

Поставлена задача вирішується тим, що у пристрій регулювання потужності в електричній мережі, що містить блок розрахунку різниці сигналів, до одного з входів якого приєднано вихід електричної мережі, а до другого входу - опорний сигнал, згідно з корисною моделлю, введено контролер у складі послідовно з'єднаних фільтра з нескінченною імпульсною характеристикою четвертого порядку та обмежувача амплітуди, при цьому вхід контролера приєднано до виходу блока розрахунку різниці сигналів, а вихід контролера приєднано до входу регулювання потужності генератора, силовий вихід якого приєднано до електричної мережі, від якої живиться навантаження мережі, причому генератор складається з послідовно з'єднаних блока логіки та силового блока, а блок логіки складається з вимикача, першого if та другого if елементів логіки, причому інформаційний вхід генератора через послідовно з'єднаний перший елемент if приєднано до входу керування вимикачем та входу вибору режиму силового блока, а вхід регулювання потужністю через послідовно приєднаний вимикач приєднано до входу регулювання потужністю силового блока, вихід вимірювання напруги силового блока через послідовно приєднаний другий блок логіки if приєднано до другого входу першого блока логіки if.

Порівняно з найближчим аналогом, де послідовно з'єднані два ПІД регулятори, причому у другому ПІД регуляторі до диференційного елемента послідовно приєднано фільтр низьких частот у запропонованому пристрої, по перше: введено контролер у вигляді фільтра з нескінченною імпульсною характеристикою четвертого порядку та обмежувач амплітуди. При цьому вихід блока регулювання приєднано до входу регулювання потужності генератора, силовий вихід якого приєднано до електричної мережі. По друге: генератор складається з послідовно з'єднаних блока логіки та

силового блока, а блок логіки складається з вимикача, першого if та другого if елементів логіки. Інформаційний вхід генератора через послідовно з'єднаний перший елемент if приєднано до входу керування вимикачем та входу вибору режиму силового блока, а вхід регулювання потужністю через послідовно приєднаний вимикач приєднано до інформаційного входу силового блока, вихід вимірювання напруги силового блока через послідовно приєднаний другий блок логіки if приєднано до другого входу першого блока логіки if. Такий пристрій дозволяє використовувати вхідні сигнали на глибину 4 такти, що дає можливість використовувати закономірності коливань потужності навантажень на більших часових інтервалах.

Наведені аргументи дозволили зробити висновок, що сукупність суттєвих ознак, викладених у формулі, є необхідною і достатньою для досягнення нового технічного результату: суттєвого розширення функціональних можливостей пристрою, який стає здатним на покращення ефективності компенсації потужності споживання. Пристрій є більш універсальним, а саме підвищує стійкість, працює з меншими похибками при значній варіації видів вхідних сигналів. У пристрої не виникають резонансні явища, значно краще враховуються властивості потужності навантажень. А також пристрій має меншу середньоквадратичну похибку регулювання.

Суть корисної моделі пояснюється кресленнями, де на фіг. 1 зображена схема пристрою регулювання потужності в електричній мережі з потужністю навантажень, яка змінюється протягом доби. На фіг. 2 представлено схему генератора у складі блока логіки та силового блока.

Схема пристрою містить: мережу Grid 1 з приєднаним навантаженням Qload 2, генератор 3 G, блок розрахунку різниці сигналів 4 Diff, контролер Controler 5, цифровий фільтр 6 з нескінченною імпульсною характеристикою четвертого порядку IIR, обмежувач амплітуди 7 Lim. Генератор 3 складається з силового блока 8 та блока логіки 9 у складі блоків логіки першого if 10 та другого if 11, вимикача 12.

Алгоритм роботи пристрою за схемою пояснюється наступним чином. Потужність навантаження 2 Qload споживається з мережі 1, потужність генератора 3 pv надходить в мережу 1, сумарна потужність Qtr навантаження 2 Qload та генератора 3 pv надходить на перший вхід блока розрахунку різниці сигналів 4 Diff, на другий вхід різниці сигналів надходить опорний сигнал Kei, на виході блока різниці сигналів 4 формується сигнал помилки e, який надходить на вхід контролера 5, який є входом цифрового фільтра 6 IIR, далі сигнал обмежується обмежувачем амплітуди 7, після чого сигнал гед надходить на вхід регулювання блока логіки 9 генератора 3.

Для режиму регулювання потужності на інформаційний вхід блока логіки 9 надходить сигнал "1", та для режиму регулювання напруги сигнал "0".

Режим регулювання потужності. Сигнал "1" на інформаційному вході блока логіки 9 переводить систему регулювання в режим регулювання потужності. Цей сигнал надходить на перший вхід першого блока if 10, далі сигнал "1" надходить на вхід вибору режиму силового блока 8 та переводить силовий блок в режим регулювання потужності. З виходу блока першого if сигнал "1" надходить на вхід керування вимикачем 12 та включає вимикач 12 в стан "замкнуто", що дозволяє сигналу гед через вимикач 12 надійти на вхід регулювання потужністю силового блока 8. Силовий блок 8 генерує потужність pv пропорційну сигналу гед. У разі, якщо напруга знаходиться у дозволених межах, на виході вимірювання напруги силового блока утримується сигнал "1", який надходить на вхід блока другого if 11, відповідно, на виході блока другого if 11 формується сигнал "1", який дозволяє блоку перший if 10 формувати "1".

Режим регулювання напругою. Сигнал "0" на інформаційному вході блока логіки 9 переводить систему регулювання в режим регулювання напругою. Цей сигнал надходить на перший вхід блока перший if 10, далі сигнал "0" надходить на вхід вибору режиму силового блока 8 та переводить силовий блок в режим регулювання напруги. З виходу блока перший if 10 сигнал "0" надходить на вхід керування вимикачем 12 та перемикає вимикач 12 в стан "розімкнуто", що забороняє сигналу гед через вимикач 12 надійти на вхід регулювання потужністю силового блока 8. Силовий блок 8 працює в режимі регулювання напруги. У разі, якщо напруга виходить з дозволених меж, на виході вимірювання напруги силового блока 8 формується сигнал "0", відповідно, на виході блока другого if 11 формується сигнал "0", який переводить вихід блока перший if 10 в сигнал "0", що призводить до роботи силового блока в режимі регулювання напруги.

Проведені дослідження аналізу характеристики активної і реактивної потужностей в мікромережі низької напруги для групи 10 приватних будинків з тактовим інтервалом вимірювання 10 с показує наступне. Сумарна реактивна потужність має високу автокореляційну функцію навантажень на інтервалі 4-х тактів, та одночасно низьку автокореляційну функцію менше 0,8 на інтервалі більше 10 тактів. Таку потужність навантаження віднесено до класу навантажень з короткою пам'яттю. Саме тому застосування запропонованого фільтра призводить до високої ефективності пристрою регулювання потужності в електричній мережі з навантаженнями з короткою пам'яттю. Тому в основі запропонованого пристрою використано фільтр з нескінченною імпульсною характеристикою IIR 4-ого порядку, який використовує вхідні та вихідні дані на глибину 4-х тактів.

Система регулювання з цифровим фільтром IIR 4 порядку дозволяє більш гнучко враховувати

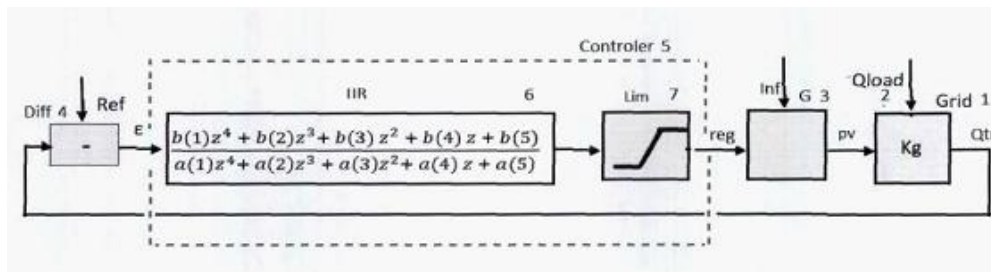
особливості коливання потужності навантаження на тижневих інтервалах часу. Тобто запропонований пристрій є більш універсальним і більш ефективний у сенсі зменшення середньоквадратичної похибки.

Запропонована система регулювання є дієвим засобом для регулювання потужності споживання саме для невеликої групи приватних будинків зі значними варіаціями потужності споживання та без ефекту згладжування, який має місце для великої кількості споживачів.

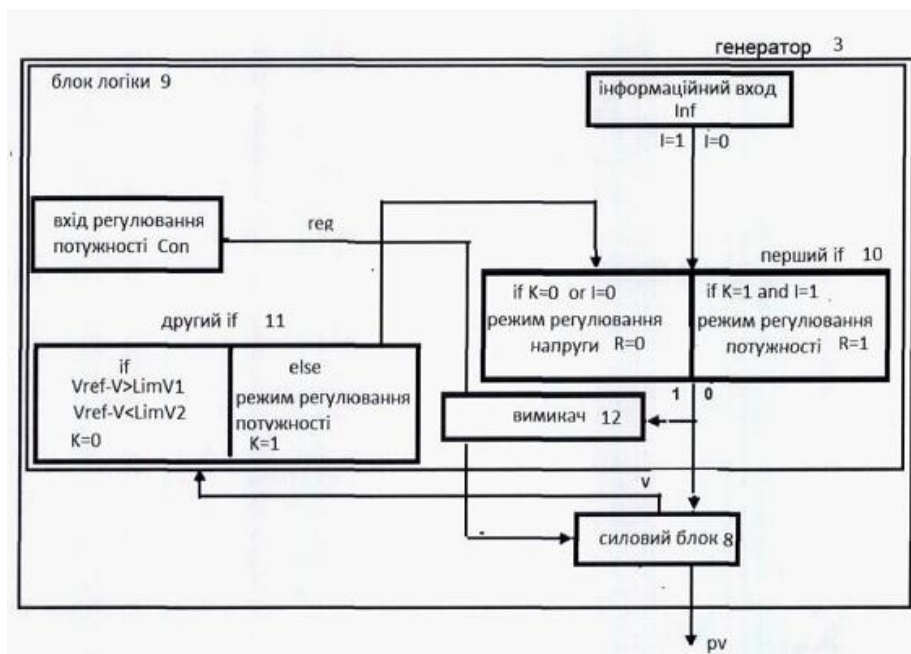
Застосування запропонованого пристрою регулювання потужності в електричній мережі зі швидкозмінною потужністю навантажень дозволяє зменшити помилку потужності та зменшити витрати на придбання потужності з зовнішньої мережі.

Джерела інформації:

1. US 11424748B1 Modified PID loop filter to suppress high frequency noise in digital phase locked loop.
2. Puyu Wang, Xing Liu, Qingwen Mo, Tao Yuan, Tianming Gu. Optimal Initialization and Starting Approach of Synchronous Condenser Integrated Power Grid. C SEE JOURNAL OF POWER AND ENERGY SYSTEMS, VOL. 10, NO. 1, JANUARY 2024. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2020.0257
3. Barkerey <https://ptolemy.berkeley.edu/projects/chess/tbd/wiki/C-code/LowPassFilterForDerivativeControl>
4. CN108549214A. A kind of high-performance PID control method. 2018-09-18 Publication.



Фиг. 1



Фиг. 2