

Practical implications. The results of investigations will be used for the creation of the low-cost mini smart-grids for small segments of electrical network.

Keywords: *smart-grids, synchronization in time, optimization of a dedicated resource of energy.*

УДК 621.314

© С.І. Випанасенко, Н.С. Дрешпак

АНАЛІЗ СПОСОБІВ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЯХ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ

© S. Vypanasenko, N. Dreshpak

ANALYSIS OF POWER REGULATION METHODS IN INDUCTION HEATING TECHNOLOGY

Виконано аналіз режимів роботи перетворювачів частоти в електротехнологіях індукційного нагріву. Розглянуті способи регулювання активної потужності установок нагріву. Визначені переваги та недоліки способів регулювання в ланцюгах постійного та змінного струмів.

Выполнен анализ режимов работы преобразователей частоты в электротехнологиях индукционного нагрева. Рассмотрены способы регулирования активной мощности установок нагрева. Определены преимущества и недостатки способов регулирования в цепях постоянного и переменного токов.

Індукційний нагрів матеріалів широко використовують в машинобудуванні та металургії для виконання технологічних операцій плавки металів і сплавів, їх нагріву перед пластичною деформацією, хіміко-термічної обробки та інших. Для реалізації технологій індукційного нагріву в діапазоні середніх частот (0,5–10 кГц) використовують напівпровідникові перетворювачі частоти. Ці пристрої можуть бути виконані із застосуванням як швидкодіючих тиристорів, так і транзисторів. Напівпровідниковий перетворювач частоти (рис.1) містить випрямляч струму 1 та автономний інвертор 2. До виходу автономного інвертора підключені електричні ланцюги навантаження: індуктор 3 та компенсуючий конденсатор 4.

Таким чином, навантаженням перетворювача частоти є паралельний LC -контур, який налаштовується на резонансну частоту, близьку до вихідної частоти перетворювача. Завдяки фільтруючій здатності паралельного LC -контурю форма вихідної напруги перетворювача близька до синусоїдальної. Характерно те, що в процесі нагріву деталі параметри індуктора установки змінюються. Це

зумовлено зміною значення активного опору, що вноситься в обмотку індуктора, а також значення індуктивності індуктора. Варіація цих параметрів супроводжується зміною резонансної частоти коливального LC - контуру. Виникає необхідність зміни вихідної частоти перетворювача з метою налаштування контуру в режим, близький до резонансу. Досвід експлуатації перетворювачів частоти свідчить про те, що в процесі роботи установки вихідна частота змінюється в незначних (до 20%) межах.

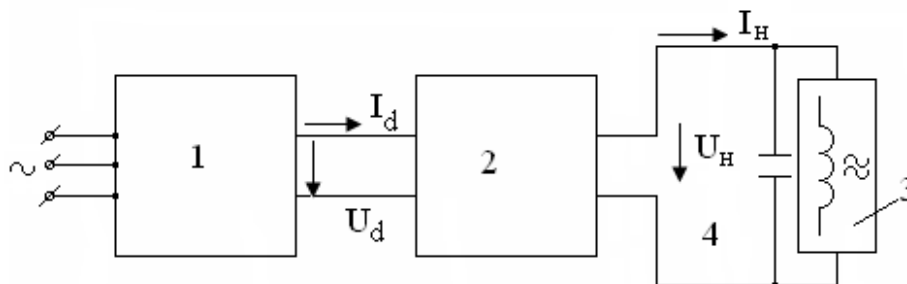


Рис.1. Схема установки індукційного нагріву

В процесі нагріву деталей виникає необхідність регулювання температурного режиму нагріву, що здійснюється зміною активної потужності установки. Регулювання потужності передбачає зміну напруги на індукторі установки: збільшення рівня напруги приводить до більш активного нагріву, а зменшення – до зниження активності процесу. Наявність перетворювача частоти як джерела живлення індукційної установки дозволяє здійснювати регулювання напруги шляхом впливу на ланцюги управління перетворювача, тобто шляхом керування імпульсами, що забезпечують управління напівпровідниковими вентилями перетворювача. Такий спосіб керування напругою є найбільш доцільним, так як мова йде про формування певної послідовності імпульсів в малопотужних ланцюгах управління. Існують різні можливості для реалізації такого управління.

Завдання публікації полягає у тому, щоб здійснити аналіз методів регулювання, прийнятних для застосування в практиці індукційного нагріву, визначити їхні переваги і недоліки, що дозволить здійснювати співставлення цих методів з урахуванням умов, характерних для різних технологій індукційного нагріву.

Для регулювання напруги на індукторі можуть бути задіяні ланцюги системи управління як випрямляча 1, так і інвертора 2. Суть управління в ланцюзі постійного струму (випрямлячі) полягає у тому, що при використанні керування напівпровідникових вентилів (тиристорів, транзисторів) існує можливість зміни вихідної напруги U_d випрямляча. Завдяки цьому змінюється напруга U_H на виході інвертора. При фазовому регулюванні вихідної напруги U_d змінюють кут регулювання α напівпровідникових вентилів випрямляча. У різних схемних рішеннях випрямлячів змінного струму регулювання кута α може здійс-

новатися в різних межах. Відповідно до цих меж змінюється глибина (ступень) регулювання напруги:

$$C = U_d / U_{d0}, \quad (1)$$

де U_{d0} – значення напруги U_d в режимі $\alpha = 0$ (максимальне значення напруги U_d).

Глибоке регулювання напруги передбачає наявність низьких рівнів U_d (режимів роботи випрямляча з малими значеннями C . Зрозуміло, що в нерегульованих випрямлячах $C=1$. Задачу регулювання вихідної напруги випрямляча U_d слід пов'язувати з енергетичними показниками і його впливом на режими споживання енергії з мережі живлення. У зв'язку з тим, що струм, який споживає випрямляч, є несинусоїдальним, процес споживання характеризується такими енергетичними показниками як коефіцієнти потужності, зсуву, викривлення. Крім того, ураховують рівні споживаної випрямлячем активної, реактивної, повної потужності та потужності викривлення [1]. При глибокому регулюванні напруги U_d випрямляча його енергетичні показники суттєво погіршуються: зменшується коефіцієнт потужності, збільшуються коефіцієнти викривлення та зсуву. Характерне збільшення споживаної реактивної, повної потужностей, потужності викривлення. Зрозуміло, що режимів глибокого фазового регулювання випрямляча слід уникати. Це забезпечить покращення енергетичних показників випрямляча і перетворювача частоти в цілому, так як випрямляч є ланкою перетворювача, яка безпосередньо підключена до мережі живлення.

Існує ряд методів [1] підвищення енергетичних показників напівпровідникових випрямлячів струму в режимах їх глибокого регулювання. Ступінь ефективності цих методів різна. Вона залежить як від способу управління вентилями, так і від структури силової схеми випрямляча. Розглянемо схемні рішення, що найбільш часто використовуються в практиці.

В схемах з перемиканням фазних вентилів на різні рівні напруги підвищення коефіцієнтів потужності і зсуву забезпечується одночасним для всіх фаз мережі підключенням фазних вентилів випрямляча до різних відпайок анодної обмотки трансформатора. Таким чином забезпечується ступінчате регулювання. У межах кожної ступені здійснюють плавне регулювання шляхом зміни кута α . Недолік цього способу регулювання полягає у порівняно складному управлінні вентилями, де дискретне управління поєднується із безперервним. В установках індукційного нагріву таке управління доцільно застосувати у випадку, коли технологічний процес передбачає часту зміну розмірів деталі, що підлягає нагріву. При цьому необхідно змінювати потужність нагріву, що досягається регулюванням вихідної напруги випрямляча.

Широке розповсюдження отримали схеми випрямлячів з нульовими вентилями. У цих схемах нульові вентиля включені паралельно ланцюгу постійного струму. При увімкнутій нульового вентиля енергія, що накопичена в індуктивностях, не повертається у мережу живлення, а виділяється в ланцюзі навантаження. Переривання струму мережі сприяє підвищенню коефіцієнту зсуву. Недолік метода полягає у тому, що уведення в дію нульового вентиля можливе тільки при значних кутах управління α . Реалізація методу передбачає встановлення нульового вентиля, розрахункова потужність якого наближається до сумарної потужності фазних вентилів випрямляча. В технологіях індукційного нагріву режими роботи з нульовим вентиляем доцільно застосовувати у випадках, коли навантаження перетворювача змінюється в широких межах. Це спостерігається, наприклад, в плавильних печах, де за режимами максимального навантаження слідує паузи нагріву, що пов'язані, наприклад, із скачуванням шлаків з поверхні розплавленого металу. В установках конвеєрного типу також можливі паузи в їх роботі, коли індуктор певний час залишається незавантаженим.

Несиметричне управління вентилями випрямляча також дозволяє суттєво покращити енергетичні показники при глибокому регулюванні. Тут кути управління вентилями α не зберігаються постійними, а змінюються в різні періоди провідності вентилів за наперед заданими алгоритмами. Зрозуміло, що реалізація достатньо складних алгоритмів управління створює труднощі у виконанні робіт по налагодженню системи. Відомі також схеми з почергово керованими вентиляльними групами. Регулювання виключає одночасне уведення в дію цих груп вентилів. Продовж управління однією із груп інша група забезпечує максимальне значення напруги, що виключає споживання останньою реактивної потужності. Недолік способу регулювання полягає у використанні декількох вентиляльних груп, що ускладнює реалізацію силової схеми випрямляча. Ясно, що цей спосіб регулювання також є комбінованим, так як передбачає дискретне уведення в дію окремих вентиляльних груп і безперервне регулювання напруги у межах існуючої комбінації.

Виконаний вище аналіз енергетичних показників керованих випрямлячів свідчить про те, що існують методи їх підвищення, але усі вони пов'язані із застосуванням більш складних схемних рішень або алгоритмів керування силовими вентилями. Ефективність існуючих методів знижується при наявності глибокого регулювання, що характерно для більшості технологій індукційного нагріву. Найменший негативний вплив на мережу живлення проявляється в режимі роботи випрямляча з кутом регулювання $\alpha = 0$, що відповідає характеристикам нерегульованого випрямляча, де в якості вентилів використовують діоди.

Деякі інші підходи до регулювання використовують в ланцюзі змінного струму (інверторі). Розглянемо способи регулювання вихідної напруги в автономних інверторах. Будемо вважати, що напруга на виході випрямляча незмін-

на і дорівнює U_d . Баланс активних потужностей на вході і виході інвертора дозволяє записати наступне рівняння:

$$\frac{U_n}{U_d} = \frac{\eta}{K \cos \varphi}, \quad (2)$$

де U_n – напруга на виході інвертора; η – ККД інвертора; $K = I_n / I_d$ (I_n – діюче значення основної гармоніки струму на виході інвертору; I_d – середнє значення струму на вході інвертора); φ – кут навантаження інвертора. Якщо не змінювати вихідну напругу U_d , то регулювання напруги U_n можна здійснювати шляхом зміни значення коефіцієнта K . Співвідношення струмів I_n / I_d може змінюватися при зміні форми кривої струму на виході інвертора. Існують способи регулювання вихідної напруги, що як в інверторах струму, так і в резонансних інверторах [2].

Відоме рішення, де до виходу автономного інвертора під'єднують випрямляч, що виконує роль активного навантаження. Вихід випрямляча підключають до входу інвертора. Регулювання цього навантаження супроводжується зміною кута навантаження інвертора, що забезпечує зміну вихідної напруги інвертора. Зрозуміло, що мова іде про ускладнення силової схеми перетворювача частоти. Тому цей спосіб регулювання не найшов широкого застосування.

Можливий також підхід до регулювання напруги, що передбачає визначення суми вихідних напруг або струмів двох інверторних мостів. Управління тиристорами окремих мостів здійснюють із затримкою в часі, що дозволяє створити фазовий зсув між синусоїдальними напругами двох мостів і досягти зміни напруги навантаження. Наявність двох інверторних мостів ускладнює схемне рішення як для силової частини перетворювача частоти, так і системи управління.

До фазового способу регулювання напруги перетворювача частоти слід віднести спосіб, пов'язаний із введенням в схему навантаження інвертора додаткових індуктивностей або ємностей. Зміна їх параметрів супроводжується зміною кута навантаження φ . Недолік цього способу пов'язаний із наявністю додаткових елементів, параметри яких необхідно змінювати в процесі регулювання.

Значно простіше реалізується спосіб регулювання, що передбачає зміну вихідної частоти перетворювача. Із збільшенням відхилення вихідної частоти перетворювача від значення резонансної частоти контуру навантаження збільшується кут навантаження φ , що супроводжується підвищенням рівня напруги U_n на виході інвертора. Цей спосіб регулювання вихідної напруги забезпечується шляхом зміни частоти слідування імпульсів управління автономним ін-

вертором. Проста реалізація способу сприяла його поширенню. Спосіб використовують більшість перетворювачів серійного випуску.

Розглянемо більш детально способи регулювання, що пов'язані із зміною значення коефіцієнта K (у відповідності із формулою (2)). Ці методи можуть бути віднесені до широтного регулювання напруги. В резонансних інверторах зміна форми імпульсу струму може забезпечуватися включенням в коливальний контур інвертора на різних етапах розвитку коливального процесу різних значень електрорушійних сил (ЕРС), діючих в контурі. В процесі розвитку процесу можлива також зміна таких параметрів коливального контуру як індуктивність або ємність. При такій зміні струм навантаження інвертора складається із декількох синусоїдальних ділянок, що відповідають різним частотам. Недолік способів широтного регулювання напруги полягає у необхідності уведення в силову схему інвертора додаткових вентилів, що ускладнює технічні рішення.

Загальний недолік способів, що передбачають регулювання напруги шляхом зміни кута навантаження φ , полягає у тому, що при малих значеннях $\cos \varphi$ навантаження інвертора споживає значну реактивну потужність, що призводить до додаткового завантаження вентилів інвертора струмом, зумовленим реактивною складовою потужності. Слід також пам'ятати, що регулювання зміною кута навантаження φ має нижню межу, що відповідає значенню $\cos \varphi = 1$. При цьому відношення U_n / U_d практично залежать тільки від K (2). У різних схемних рішеннях автономних інверторів значення K можуть суттєво відрізнятися.

Розширити нижню межу регульовальної здатності напруги інверторів дозволяє застосування в перетворювачах частоти комбінованого регулювання. Воно передбачає зміну кута навантаження в заданих межах, а також зміну вихідної напруги випрямляча у випадку, коли регульовальні можливості зміною кута навантаження φ вичерпані, а технологічний процес потребує встановлення більш низького рівня вихідної напруги.

В технологіях індукційного нагріву існує також можливість регулювання реактивної потужності перетворювача шляхом зміни параметрів несинусоїдального струму, що протікає через індуктор. Такий спосіб регулювання у деяких випадках, наприклад, наведених в [3], є вдалим рішенням, що забезпечує достатньо просту схемну реалізацію інвертора. Використання несинусоїдального струму в технологіях індукційного нагріву є виправданим, так як процеси нагріву, як правило, не потребують виконання особливих вимог до форми струму, що протікає в індукторі.

Висновки

1. В електротехнологічних процесах індукційного нагріву параметри навантаження перетворювача частоти часто змінюються в широких межах, що потребує регулювання потужності установки шляхом зміни її вихідної напруги.

2. Здійснено аналіз способів регулювання напруги в ланцюгах постійного та змінного струмів. Показано, що таке регулювання часто потребує ускладнення структурної побудови силових ланцюгів випрямляча, інвертора, або застосування більш складних алгоритмів управління вентилями. Реалізація регулювання напруги в широких межах приводить до погіршення енергетичних показників перетворювача частоти, що проявляється у негативному впливі на мережу живлення, зниженні значення коефіцієнту потужності ланцюга навантаження.

3. В практиці індукційного нагріву прийнятне використання несинусоїдального струму індуктора, що зумовлено у більшості випадків відсутністю особливих вимог до форми струму. Несинусоїдальна форма струму може бути реалізована застосуванням порівняно простих схемних рішень автономних інверторів.

Перелік посилань

1. Maevskiy, O.A. (1978). Enerheticheskiye pokazately ventylnykh preobrazovatelei. Moskva: Enerhiya.
2. Vypanasenko, S., Azam Al Satry. (2002). Dyskretnoe rehulyrovanye moshchnosty v elektrotekhnolohycheskoi ustanovke ynduktsyonnoho nahreva. Tekhn.elektrodynamika. Tematychnyi vypusk, 66-68.
3. Dreshpak, N. (2009). Rezhymy induktsiinoho nahrivu tsylindrychnykh detalei, z'iednanykh posadkoiu z natiahom. Tekhnichna elektrodynamika, 61-66.

ABSTRACT

Purpose. Analysis and comparison of methods for power regulation in direct and alternating currents circuits of autonomous frequency converters. Research of energy indicators of converters at different methods of power regulation.

Methodology. Investigating advantages and disadvantages of power control methods, concerning the rates of power and parameters of modes that provide the heating process.

Findings. The analysis shows that during induction heating the load of frequency converter can vary considerably and requires appropriate power regulation. The advantages and disadvantages of different regulation methods are defined.

Exclusivity. Comparing different ways of regulation in terms of energy efficiency and the degree of complexity of applied technical solutions. Determining dependence between energy indicators of frequency converter and mode parameters of rectifier, autonomous inverter.

The practical value of the work is the ability to choose rational method of regulation in induction heating technology. Herewith the features of electrotechnological processes, in terms of duration and intensity of heating, are taken into account.

Keywords: *frequency converters, power regulation, induction heating*