УДК 681.12

С. М. Левицький[1]

ДІАГНОСТУВАННЯ КОНДЕНСАТОРІВ СИЛОВОЇ СХЕМИ СТАТКОМ

[1] Вінницький національний технічний університет;

Анотація

Розроблено математичну модель системи діагностування конденсаторів ланки постійного струму статичних синхронних компенсаторів, яка дозволяє вчасно виявляти критичний стан робочого конденсатора та запобігати пошкодженням компенсаторів.

Ключові слова: конденсатор, інвертор, діагностування, компенсатор.

Abstract

Abstracts. *The paper presents the mathematical model and the structure of diagnosis system for capacitors of DC circuits of static synchronous compensator, which allows to identify the critical operating state of the capacitor and to prevent damage of the compensators.*

Keywords: capacitor, invertor, diagnosis, compensator.

Вступ

Контроль стану та діагностика окремих елементів систем компенсації реактивної потужності необхідні в більшій чи меншій мірі залежно від їх застосування. Діагностика допомагає запобігти незапланованому простою обладнання, організувати роботу обладнання в аварійному режимі на випадок несправності, зменшити час та затрати відновлення роботи обладнання [1, 2]. Конденсатори, що входять до складу статичних синхронних компенсаторів, мають обмежений термін експлуатації, який часто менший, ніж у силових напівпровідників.

Метою роботи є розробка математичної моделі системи діагностування конденсаторів ланки постійного струму статичних синхронних компенсаторів, яка враховує фактичний термін напрацювання на відмову конденсатора, динамічні збурення та дозволяє вчасно виявляти критичний стан робочого конденсатора.

Результати дослідження

Електролітичні конденсатори, які використовуються в складі автономних інверторів напруги перетворювачів частоти регульованих електроприводів володіють відповідним терміном напрацювання на відмову в роботі (англ. *Lifetime*), який при розробці системи діагностування являється визначальним, оскільки є функціоналом багатьох критеріїв експлуатації перетворювачів частоти.

В загальному випадку фактичний термін напрацювання L_f на відмову визначається за паспортним терміном напрацювання на відмову L_n та експлуатаційним коефіцієнтом k [3]

$$L_f = L_n \cdot k. \tag{1}$$

Час напрацювання конденсатора, який відповідає поточному ресурсу може бути визначеним, виходячи з (1) як різниця між паспортним терміном напрацювання та фактичним

$$t = L_n - L_f = L_n \cdot (1 - k). \tag{2}$$

Імовірність безвідмовної роботи електронної апаратури визначається, виходячи з відомої інтенсивності відмов λ, що найчастіше має постійне значення ($\lambda = const$)[4]

$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t}, \tag{3}$$

Відповідно, імовірність виникнення відмови в процесі роботи конденсатора на момент часу t визначатиметься

$$N(t) = 1 - P(t). \tag{4}$$

Отже, функція залежності імовірності виникнення відмови $N(t)$ від експлуатаційного коефіцієнту, яка отримана шляхом підстановки рівняння (2) в вираз (4) з відповідним перетворенням t через k, матиме вигляд симетричної експоненти (рис. 1).

$$N(k) = 1 - e^{(-\lambda \cdot L_n \cdot (1-k))}. \quad (5)$$

Слід зауважити, що більшому значенню імовірності виникнення відмови відповідає і більша кількість конденсаторів, яка вийшла з ладу при досягненні відповідного значення експлуатаційного коефіцієнта. Тому в процесі розробки структури системи діагностування в якості основного діагностичного параметру буде розглядатись саме експлуатаційний коефіцієнт *k*.

Експлуатаційний коефіцієнт враховує вплив трьох вагових коефіцієнтів на фактичний термін напрацювання: температури, пульсуючого (випрямленого) струму та робочої напруги та визначається їхнім добутком [5].

$$k = k_t \cdot k_r \cdot k_v. \quad (6)$$

Температурний ваговий коефіцієнт зазвичай визначається за правилом «10 Кельвінів»: зниження температури оточуючого середовища на 10 К приводить до збільшення терміну експлуатації вдвічі. Температурний коефіцієнт розраховується за формулою [6]

$$k_t = 2^{\frac{T_o - T_a}{10}}, \quad (7)$$

де T_o – максимально допустима температура експлуатації, T_a – фактична температура роботи конденсатора.

Ваговий коефіцієнт k_r враховує вплив пульсуючого струму, що отриманий після випрямлення на мостовій схемі випрямляча перетворювача частоти. На величину пульсуючого струму впливає також режим роботи електроприводу та інвертора (розгін, гальмування, динамічна зміна навантаження тощо). Внаслідок зміни амплітуди пульсуючого струму змінюватимуться і втрати потужності в конденсаторі $I^2 \cdot ESR$ (*equivalent series resistance* – еквівалентний послідовний опір конденсатора в колі змінного струму), зміна втрат потужності також впливатиме на тепловий режим конденсатора. *ESR* конденсаторів залежить від частоти пульсуючого струму та робочої температури. В роботі приймемо значення частоти пульсуючого струму рівним 300 Гц, що відповідає частоті пульсацій випрямленої напруги в схемі Міткевича, така частота пульсацій практично не приводить до відхилення *ESR* відносно його номінального значення, що встановлюється при частоті 100-120 Гц [5]. В [3] запропоновано для розрахунку вагового коефіцієнту пульсуючого струму використати емпіричну залежність, яку можна виразити за допомогою рівняння (8)

$$k_r = \begin{cases} 4\exp\left(\left(1 - \dfrac{I_a}{I_o}\right) \cdot \dfrac{T_o - T_a}{10}\right), \text{ якщо } T_a > 85°C,\ I_a > I_o; \\ 2\exp\left(\left(1 - \dfrac{I_a}{I_o}\right) \cdot \dfrac{T_o - T_a}{10}\right), \text{ якщо } T_a \le 85°C, I_a \le I_o; \end{cases}, \quad (8)$$

де I_a – фактичний пульсуючий струм конденсатора, I_o – номінальний пульсуючий струм конденсатора для промислової частоти.

Отже, для встановлення експлуатаційного коефіцієнту *k* та визначення ступеня його наближення до несправного стану слід вимірювати наступні параметри: температуру конденсатора, миттєве значення струму конденсатора та напругу на його виводах. За вказаними параметрами слід по рівняннях (7-8) визначити вагові коефіцієнти, а за рівнянням (6) обчислити ваговий коефіцієнт.

Висновок щодо можливості подальшої експлуатації перетворювача частоти з діагностованим конденсатором [7] доцільно формувати не миттєво при виході експлуатаційного коефіцієнта *k* за зону нечутливості, але слід враховувати і часовий фактор. Така модель може бути описана виразом (9).

$$k(t) = 2^{\frac{T_o - T_a(t)}{10}} \cdot m^{\left(1 - \frac{I_a(t)}{I_o}\right)\frac{T_o - T_a(t)}{10}} \cdot \left(\frac{U_a(t)}{U_o}\right)^n,$$

$$\begin{cases} k(t) < k_{нз} \wedge k(t-\tau) < k_{нз} \wedge \dfrac{dk(t)}{dt} \le 0 \rightarrow \textit{несправність}; \\ k(t) \in [k_{нз}; k_{вз}] \wedge \dfrac{dk(t)}{dt} \le 0 \rightarrow \textit{на межі несправності}; \\ k(t) > k_{вз} \vee \left(k(t) \in [k_{нз}; k_{вз}] \wedge \dfrac{dk(t)}{dt} > 0\right) \rightarrow \textit{справний стан}, \end{cases} \quad (9)$$

де τ – час затримки для формування діагностичного висновку.

Включення похідної по часу експлуатаційного коефіцієнта є обов'язковим та дозволить уникнути прийняття системою діагностування хибних рішень навіть при виході його за допустимі межі (в основному в сторону $k_{из}$), однак тенденції до повернення його в зону нечутливості, або переходу $k(t)$ із зони нечутливості відносно критичного значення в зону справної стійкої роботи з високим k. Разом з тим при тривалому і незворотному процесі зниження обчисленого коефіцієнту k система повідомить про роботу конденсатора на межі справності, або про його несправність.

Висновки

Розглянуто вплив параметрів роботи конденсаторів перетворювачів частоти на їх термін напрацювання на відмову, що дозволяє сформулювати математичну модель системи діагностування конденсаторів та її структурну схему.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Fuchs Friedrich. Some Diagnosis Methods for Voltage Source Inverters In Variable Speed Drives with Induction Machines/ Friedrich W. Fuchs // University of Kiel, Germany. – IEEE, Industrial Electronics Conference, Roanoke, Virginia, USA, 2002 – 8 p.
2. Gasperi M. L. A Method for Predicting the Expected Life of Bus Capacitors / M. L. Gasperi – Rockwell Automation // IEEE Industry Applications Society, Annual Meeting. 1997 – 6 p.
3. Albertsen A. Electrolytic Capacitor Lifetime Estimation / Dr. Arne Albertsen – Jianghai Europe Electronic Components GmbH, 2012 – 13 p.
4. Половко А. М. Основы теории надежности // А. М. Половко, С. В. Гуров. – . СПб.: БХВ-Петербург. – 2008. – 704с.
5. Радюшкин О. Методы оценки срока эксплуатации электролитических конденсаторов / Олег Радюшкин. – Силовая электроника. – 2010. – № 5. – С. 19-22.
6. Khandebharad A. R. Electrolytic capacitor online failure detection and life prediction methodology / A. R. Khandebharad, R. B. Dhumale, S. S. Lokhande // International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2015. – №2, vol. 4 – P.78-83. – ISSN 2321-7308.
7. Левицький С. М. Система діагностування конденсаторів ланки постійного струму перетворювачів частоти / С. М. Левицький, Д. П. Проценко, А. А. Бартецький // Вісник Харківського НТУ "ХПІ". – 2015. – №12(1121). – С.320-323. – ISSN 2079-3944.

Левицький Сергій Михайлович — канд. техн. наук, доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Вінницький національний технічний університет

Науковий керівник: ***Бурбело Михайло Йосипович*** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Levytskyi Sergiy M. — Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of the Chair of Electric Consumption Systems and Power Management, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

Supervisor: ***Burbelo Myhailo J.*** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electric Consumption Systems and Power Management, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia