

التحكم في المفاعل

- مقدمة • أدوات التحكم في المفاعل • فاعلية قضبان التحكم • فاعلية المواد الماصة الذاتية • معادلات التحكم في المفاعل • تمارين

(٩,١) مقدمة

يحتوي المفاعل قبل بداية التشغيل على كمية من المواد الانشطارية تفوق الكمية الحرجة. ومن الطبيعي أن يكون الأمر كذلك؛ لأنه لو كان يحتوي على الكمية الحرجة فقط لتوقف المفاعل مباشرة بعد أول انشطار؛ ولهذا فإن كمية المادة الانشطارية الزائدة على الكتلة الحرجة هي التي توفر الطاقة المطلوبة طوال مدة دورة المفاعل. ولكي لا يصبح المفاعل من البداية فوق الحالة الحرجة يجب استخدام أدوات تحكم تجعل المفاعل مستقراً حول الحالة الحرجة أثناء التشغيل والتدخل عند الحاجة لتوقيف المفاعل في أي لحظة. تستخدم لأغراض التحكم قضبان لها قدرة كبيرة على امتصاص النيوترونات، وذلك بتحريك مواقع هذه القضبان في قلب المفاعل. وتستعمل أيضاً لأغراض التحكم مواد كيميائية ماصة للنيوترونات، وذلك بتغيير تركيز هذه المواد في سائل التبريد والمهدئ. وتتم عملية التحكم في المفاعل بتغيير قيمة عامل التضاعف الفعال (K_{eff}) من

خلال تغيير مواقع قضبان التحكم الأساسية ، وتغيير تركيز المواد الكيميائية الماصة للنيوترونات في المبرد أحياناً. وسنتناول في هذا الفصل دراسة فاعلية قضبان التحكم وفاعلية المواد الماصة ، وكيفية استخدامها للتحكم في تشغيل المفاعل.

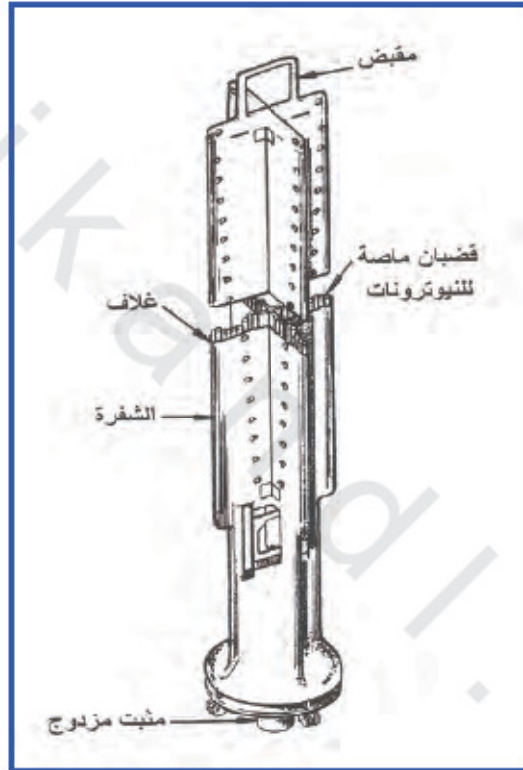
(٩,٢) أدوات التحكم في المفاعل

كما سبق شرحه في الفصل السابق ، فإن التغير الطبيعي لمكونات قلب المفاعل أثناء التشغيل يؤدي إلى تغير في مستوى الفاعلية بسبب استنزاف الوقود ، وارتفاع درجة الحرارة ، وتكوين المواد السامة إلى آخره ؛ ولهذا فإن مواد التحكم في المفاعل أساسية من بداية التشغيل للوصول إلى الحالة الحرجة والمحافظة على مستوى الفاعلية اللازم لإنتاج قدرة محددة وتوقيف المفاعل عند الحاجة. وتتمثل هذه الأدوات أساساً في قضبان التحكم من ناحية ومواد ماصة للنيوترونات تُضاف إلى سائل التبريد بتركيز معين.

(٩,٢,١) قضبان التحكم

تُصنع قضبان التحكم وفق أشكال هندسية مختلفة ومن خليط عدة مواد أهمها المواد التي لها قدرة كبيرة على امتصاص النيوترونات ، مثل البورون والكادميوم. وتتميز قضبان التحكم في مفاعلات الجيل الأول بالشكل الأسطواني ، وقلة عددها ، والتركيز العالي للمواد الماصة للنيوترونات. لكن مع تطور المفاعلات النووية تعددت أشكال قضبان التحكم وكثر عددها في المفاعلات وخف تركيزها من المواد الماصة لتفادي التقلبات الكبيرة لفيض النيوترونات عند تحريك قضبان التحكم. ويوضح الشكل رقم (٩,١) أحد النماذج لقضبان التحكم المستخدمة في بعض المفاعلات النووية الحديثة. ولقد تحسن أداء قضبان التحكم المتحركة تدريجياً من عدة نواح ، فصُممت كل مجموعة منها لوظيفة محددة مما يجعل لها مواصفات خاصة بها. ومن هذه المجموعات ما يُستعمل في بداية التشغيل وإيقاف المفاعل فقط ، ومنها ما يُستعمل أثناء التشغيل لتعديل المستويات البسيطة لتغير الفاعلية إلى آخره. وبالإضافة إلى قضبان التحكم

المتحركة هذه تُوضع في مواقع محددة لبعض المفاعلات قضبان ثابتة تحتوي بعض أجزائها على مواد سامة تستهلك تدريجياً طوال مدة دورة الوقود. وتساهم كل هذه التحسينات في أداء أفضل لقضبان التحكم وأكثر سلامة للمفاعل.



الشكل رقم (٩,١). أحد أشكال قضبان التحكم [١٤].

(٩,٢,٢) المواد الماصة للنيوترونات

تُستخدم المواد الماصة للنيوترونات، مثل حامض البوريك (H_3BO_3) في مفاعلات الماء لأغراض التحكم، وذلك بتغيير تركيز هذا الحامض في التبريد. ويُغير التركيز آلياً،

إلا أن هذه العملية لا تكفي للتحكم في المفاعل لكنها عامل مساعد ومهم لقضبان التحكم المتحركة التي تتميز بسرعة الاستجابة. ولطريقة التحكم المزدوجة التي تستخدم قضبان التحكم والمواد الماصة في المبرد فوائد اقتصادية وفيزيائية سنوضحها فيما بعد.

(٩,٣) فاعلية قضبان التحكم

تُستخدم قضبان التحكم في المفاعلات أساساً للتشغيل وإخماد المفاعل عند الحاجة وتعديل التغيرات البسيطة لمستوى الفاعلية الناتجة عن استنزاف الوقود، وتركيز المواد السامة، وتغير مستوى القدرة المنتجة؛ ولهذا يجب دراسة فاعلية قضبان التحكم لمعرفة تأثير كل منها، الأمر الذي سيساعد على أداء أفضل واختيار التصميم الأمثل لتوزيع قضبان التحكم في قلب المفاعل.

(٩,٣,١) فاعلية قضيب مركزي واحد

ندرس أولاً الحالة البسيطة لمفاعل افتراضي أسطواني الشكل بدون عواكس له الأبعاد المفترضة H و R ، ويحتوي نظام تحكمه على قضيب واحد مركزي، كما هو موضح في الشكل رقم (٩,٢). ولتبسيط الحسابات نفترض أيضاً أن المفاعل في الحالة الحرجة عندما يكون قضيب التحكم خارج قلب المفاعل، وأن مكان القضيب عند إخراج لا يبقى فارغاً بما أنه يتحرك داخل سائل.

يمكن استعمال نظرية انتشار النيوترونات التي شُرِحتْ لحساب فاعلية قضيب التحكم المركزي في الحالات الآتية.

أولاً: الحالة الحرجة (قضيب التحكم خارج قلب المفاعل)

$$(٩,١) \quad \nabla^2 \phi_T + B_0^2 \phi_T = 0$$

$$(٩,٢) \quad K_0 = \frac{K_\infty}{1 + B_0^2 M_T^2} = 1$$

حيث إن :

B_0^2 : الانحناء الهندسي للمفاعل في الحالة الحرجة.

M_T^2 : مساحة هجرة النيوترونات.

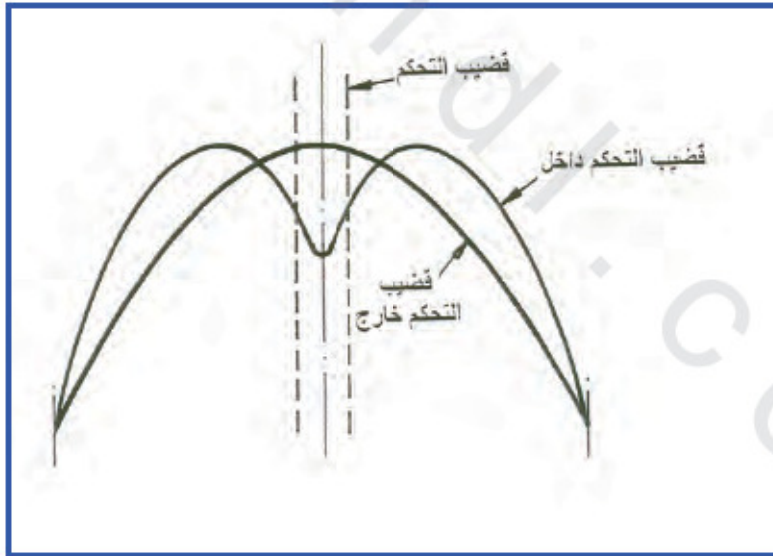
ثانياً : الحالة دون الحرجة (قضيبي التحكم داخل قلب المفاعل)

$$(٩,٣) \quad \nabla^2 \phi_T + B \phi_T = 0$$

$$(٩,٤) \quad K = \frac{K_\infty}{1 + B^2 M_T^2}$$

حيث إن :

B^2 : الانحناء الهندسي للمفاعل في الحالة دون الحرجة.



الشكل رقم (٩,٢). تغير فيض النيوترونات حسب موقع قضيب واحد مركزي للتحكم في المفاعل [١٦].

(٩,٣,١,١) فاعلية إدخال تام لقضيب التحكم

يمكن الآن استنتاج فاعلية قضيب التحكم الناتجة عن تغير عامل التضاعف إثر إدخال تام لقضيب التحكم. ونُحسب الفاعلية الناتجة عن هذه العملية وفق المعادلة الآتية:

$$(٩,٥) \quad \rho_{\omega} = |\rho| = \frac{K - K_0}{K} = \frac{(B^2 - B_0^2)M_T^2}{1 + B_0^2 M_T^2}$$

نُلاحظ أن فاعلية قضيب التحكم مرتبطة بقيم الانحناء الهندسي، وتحسب الأولى وفق نظرية انتشار النيوترونات، التي تؤدي إلى النتائج الآتية:

$$(٩,٦) \quad B_0^2 = \alpha_0^2 + B_0^2$$

$$\pi/H = B_0 \quad ; \quad \alpha_0 = \frac{2.405}{R}$$

لكن حساب الانحناء B^2 أكثر تعقيداً، لأن نظرية الانتشار تصبح غير صحيحة قرب سطح قضيب التحكم لكثرة امتصاصه للنيوترونات. ولهذا غالباً ما تُستعمل لحل هذه المسألة نظرية انتقال النيوترونات؛ أو نظرية التغيرات البسيطة بافتراض $B \approx B_0$ و $\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha$. وبما أن هذه الحسابات طويلة وموجودة في بعض المراجع سنكتفي بكتابة النتيجة النهائية الآتية:

$$(٩,٧) \quad \rho_{\omega} = \frac{7.4 \times M^2}{(1 + B_0^2 M^2) R^2} [0.116 + \ln(\frac{R}{2.405 + a}) + \frac{d}{a}]^{-1}$$

حيث إن:

a: نصف قطر قضيب التحكم.

d: مسافة الاستطالة الخطية التي تحقق الشرط الحدودي عند سطح القضيب

الذي يُعبر عنه بالمعادلة الآتية:

$$(٩,٨) \quad \frac{I}{\phi_T} \frac{d\phi_T}{dt} = \frac{1}{d}$$

أما قيمة هذه المسافة فتحسب وفق معادلة الصيغة التجريبية الآتية :

$$(٩,٩) \quad d = 2.131 \times \bar{D} \times \frac{a \cdot \Sigma_t + 0.9354}{a \cdot \Sigma_t + 0.5098}$$

حيث إن :

$\bar{D}$: معدل ثابت انتشار النيوترونات.

Σ_t : المقطع العرضي المجهاري لانتقال النيوترونات.

تجدر الإشارة إلى أن اعتماد نظرية الانتشار لزمرة واحدة من النيوترونات يؤدي عادة إلى تقدير أكبر لفاعلية قضيب التحكم ؛ وذلك لأن القضيب لا يمتص في الواقع كل النيوترونات بالكفاءة نفسها. ولهذا فعندما تقتضي الحاجة إلى نتائج أكثر دقة يجب استعمال نظرية الانتشار لأكثر من زمرة مما يزيد الحسابات تعقيداً بالطبع ، وذلك ثمن الدقة العالية.

(٩,٣,١,٢) إدخال جزئي لقضيب التحكم

يتطلب تشغيل المفاعل في العديد من الحالات إلى إدخال جزئي لقضيب التحكم ، كما هو الحال في بداية التشغيل ، أو عند تعديل مستوى قدرة المفاعل. يمكن حساب الفاعلية الناتجة عن إدخال جزئي لقضيب التحكم نظرياً ، لكن يفضل عادةً معايرة قضبان التحكم تجريبياً. وأدت العديد من هذه التجارب إلى استنتاج معادلة لها صيغة تجريبية تربط بين فاعلتي إدخال تام وجزئي لقضيب التحكم. وتكتب هذه المعادلة على النحو الآتي :

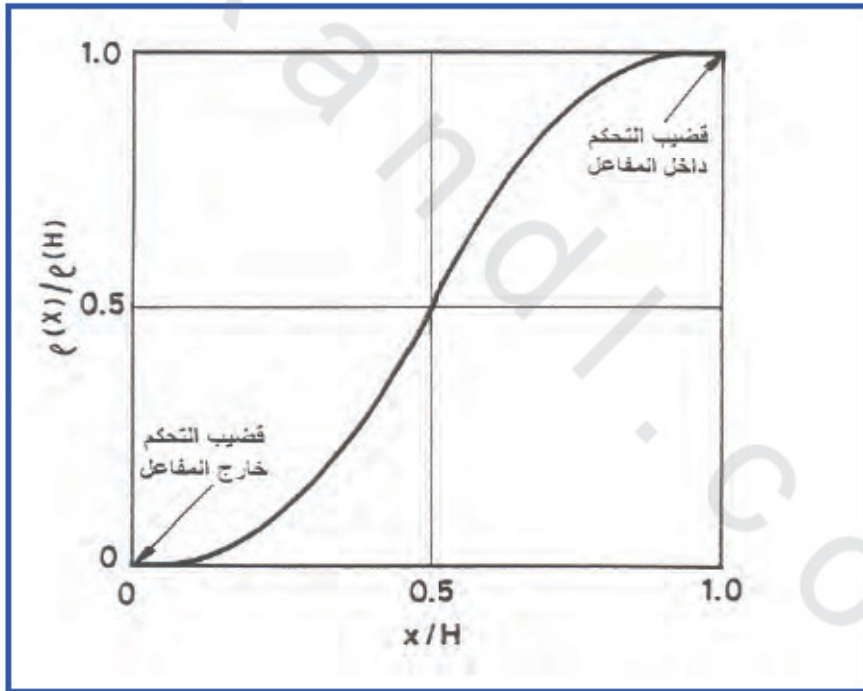
$$(٩,١٠) \quad \rho_w(x) = \rho_w(H) \left[\frac{x}{H} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi x}{H}\right) \right]$$

حيث إن :

$\rho_w(x)$: فاعلية إدخال جزئي لقضيب التحكم بمسافة قدرها x .

$\rho_w(H)$: فاعلية إدخال تام لقضيب التحكم بمسافة قدرها H ، ارتفاع قلب المفاعل الأسطواني.

يُوضح الشكل رقم (٩,٣) نسبة تغير الفاعلية حسب نسبة مسافة إدخال قضيب التحكم في قلب المفاعل. ويلاحظ أن هذا الشكل المميز يدل على أن تغير الفاعلية محدود في بداية أو نهاية تحرك قضيب التحكم ليصبح شبه خطي في منتصف ارتفاع قلب المفاعل. ويُفسر ذلك بضعف شدة فيض النيوترونات في أطراف المفاعل وغزارته في وسط قلب المفاعل ، حيث يكون التأثير الأكبر لقضيب التحكم.



الشكل رقم (٩,٣). تغير نسبة الفاعلية مع نسبة الإدخال الجزئي لقضيب التحكم.

(٢, ٣, ٩) فاعلية القضبان العنقودية

لا يستعمل في الواقع قضيب واحد للتحكم حتى في المفاعلات البحثية الصغيرة بل تستعمل دائماً مجموعة من القضبان أو ما يسمى بالقضبان العنقودية. وتوزع قضبان التحكم في مناطق معينة داخل قلب المفاعل لتحسين انتظام توزيع فيض النيوترونات، مما يؤدي إلى تجانس للقدرة ودرجة الحرارة في أنحاء قلب المفاعل؛ ولهذا الغرض تحتوي مفاعلات القدرة على مجموعة قضبان عنقودية توضع داخل مجموعة أقلام الوقود. ويتكون كل عنقود من حوالي عشرين قضيب تحكم. وهكذا يصبح التحكم في المفاعل عن طريق التحرك الآلي لهذه المجموعات تحت إشراف الحاسب الآلي والفني المختص بالتشغيل اعتماداً على القياسات المباشرة لفيض النيوترونات، الأمر الذي يؤدي إلى الحصول على الفيض المناسب للقدرة المطلوبة وأحسن توزيع له.

تُحسب فاعلية القضبان العنقودية عن طريق مقارنة عاملي التضاعف للمفاعل عند إدخال أو إخراج عناقيد قضبان التحكم؛ ولهذا الغرض يقسم قلب المفاعل إلى حوالي ألف خلية موزعة وفق شبكة منتظمة، بحيث يوجد داخل كل خلية قضيب تحكم. وهكذا يمكن تعريف ما يسمى بمعامل استعمال قضيب التحكم f_R الذي يساوي نسبة النيوترونات الحرارية الممتصة من طرف قضيب التحكم لكل نيوترون انشطاري تمت تهدئته داخل الخلية. وتُستعمل نظرية انتشار النيوترونات داخل الخلية لحساب المعامل f_R مع الشروط الحدودية خارج الخلية على سطح قضيب التحكم. وتؤدي هذه الحسابات إلى معادلة معامل استعمال قضيب التحكم الآتية:

$$f_R = \frac{(z^2 - y^2) \times d}{2a} + E(y, z) \quad (٩, ١١)$$

حيث إن:

a : نصف قطر قضيب التحكم.

d : مسافة الاستطالة عند سطح قضيب التحكم.

$\frac{a}{L_T} = y$ ، علماً أن L_T يمثل طول المسار الحر للنيوترونات.

$\frac{R_C}{L_T} = z$ ، علماً أن R_C تمثل نصف قطر الخلية.

$E(y, z)$: دالة خاصة بخطوة خلايا الشبكة وتحتوي على دوال باسال I و K

المشهورة.

$$(٩, ١٢) \quad E(y, z) = \frac{z^2 - y^2}{2 \times y} \left[\frac{I_0(y) K_1(z) + K_0(y) I_1(z)}{I_1(z) K_1(y) - K_1(z) I_1(y)} \right]$$

يمكن الآن بعد تعريف المعامل f_R حساب فاعلية قضبان التحكم العنقودية وفق المعادلة :

$$(٩, ١٣) \quad \rho_{\omega} = |\rho| = \frac{K_0 - K}{K} = \frac{K_0 - K_0(1 - f_R)}{K_0(1 - f_R)} \\ = \frac{f_R}{1 - f_R}$$

(٩, ٣, ٣) فاعلية قضبان التحكم على شكل صليب

يتكون قضيب التحكم على شكل صليب من شفرتين متقاطعتين توضع داخلهما قضبان صلبة ماصة للنيوترونات، أو مواسير مملوءة بمسحوق كبريد البرون (B_4C). ويستخدم هذا النوع من القضبان للتحكم في مفاعلات الماء المغلي على وجه الخصوص، وذلك لسهولة وضعها بين مجموعات أقلام الوقود كما هو موضح في الشكل رقم (٩, ٤).

يصعب حساب فاعلية هذا النوع من قضبان التحكم مباشرة لما لشكلها الهندسي من تعقيد، إلا أنه يمكن تقدير ذلك باستعمال الطريقة السابقة نفسها، وذلك بتقسيم المفاعل إلى خلايا منتظمة كما هو موضح في الشكل رقم (٩, ٥). بعد ذلك تُستعمل نظرية الانتشار لحساب كثافة تيار النيوترونات المتجه نحو أطراف الخلية، التي يُعد شكلها متوازي الأضلاع. ويستنتج من هذه الحسابات معامل استعمال قضيب

التحكم، الذي يساوي نسبة عدد النيوترونات التي يمتصها قضيب التحكم (تساوي كثافة التيار خارج مساحة شفرات القضيب) على عدد النيوترونات الحرارية المنتجة داخل الخلية. وتكتب معادلة معامل استعمال قضيب التحكم على شكل صليب على النحو الآتي:

$$(٩, ١٤) \quad f_R = \frac{4(l-a)L_T}{(m-2a)^2} \cdot \frac{1}{\frac{d}{L_T} + \text{Coth}\left[\frac{(m-2a)}{2L_T}\right]}$$

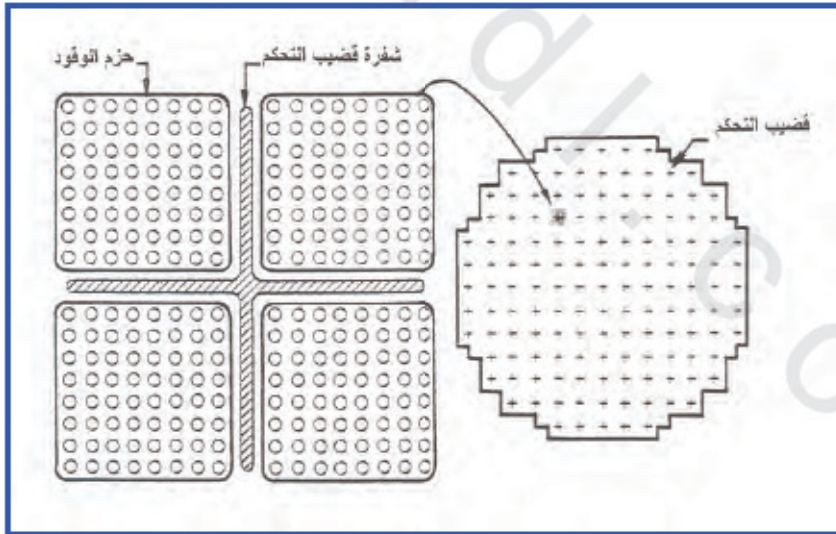
حيث إن:

m, l, a : أبعاد الخلية وقضيب التحكم، كما هو موضح في الشكل رقم (٩, ٥).

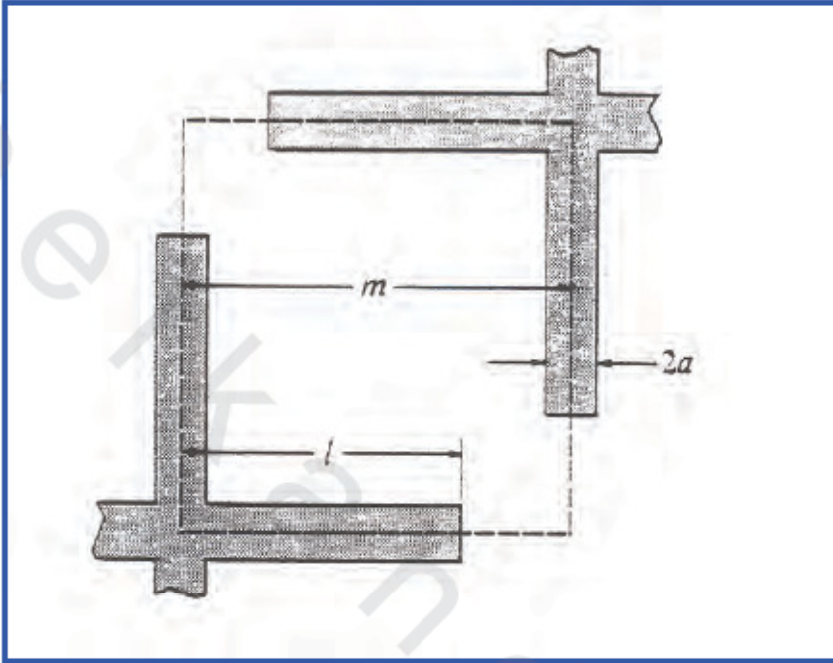
L_T : طول مسار انتشار النيوترونات.

d : مسافة الاستطالة عند سطح قضيب التحكم (علماً بأنه يمثل متوسط ثابت

الانتشار).



الشكل رقم (٩, ٤). قضيب تحكم على شكل صليب [١٦].



الشكل رقم (٩,٥). أبعاد قضيب تحكم على شكل صليب [١٦].

تُحسب فاعلية قضبان التحكم على شكل صليب وفق المعادلة (٩,١٤) السابقة، وذلك باستخدام معامل الاستعمال f_R على النحو الآتي:

$$\rho_{\omega} = \frac{f_R}{1 - f_R} \quad (٥,١٩)$$

تجدر الإشارة إلى أن حساب فاعلية هذا النوع من قضبان التحكم غالباً ما تكون معقدة وصعبة؛ ولهذا فإنها تحسب بمساعدة الحاسب الآلي باستعمال كود خاص يتبنى نظرية انتشار الزمر المتعددة للنيوترونات وفق الأبعاد الثنائية. وللتأكد من هذه الحسابات تُقاس تجريبياً فاعلية بعض القضبان ومقارنتها بحسابات فاعلية هذه القضبان.

مثال :

أوجد فاعلية قضبان التحكم الموزعة وفق شبكة ذات خلايا مستطيلة لمفاعل ماء مغلي، علماً أن قضبان التحكم على شكل صليب طول الشفرة ٣٠ سم وسمكها ١٠ سم والمسافة بين مركز كل خلية يساوي ٥٠ سم. أما قيم خصائص المفاعل فهي كما يلي :

$$\bar{\Sigma}_a = 0.25 \text{ cm} ; \quad L_T = 1.25 \text{ cm}$$

الحل :

أولاً : معامل استعمال قضيب التحكم

$$f_R = \frac{4(l-a)L_T}{(m-2a)^2} \cdot \frac{1}{\frac{d}{L_T} + \text{Coth}\left[\frac{(m-2a)}{2L_T}\right]}$$

$$d = 2.131 \times \bar{D} = 2.13 \times \bar{\Sigma}_a \cdot L_T^2 = 0.832 \text{ cm}$$

$$m = \frac{50}{\sqrt{2}} = 35.355$$

$$a = \frac{1}{2} = 0.50$$

$$l = \frac{30}{2} = 15.0$$

$$f_R = \frac{4(15-0.5) \times 1.25}{(35.355-2 \times 0.5)^2} \cdot \frac{1}{\frac{0.832}{1.25} + \text{Coth}\left[\frac{(35.355-2 \times 0.5)}{2 \times 1.25}\right]} = 0.0369$$

ثانياً : فاعلية قضبان التحكم

$$\rho_\omega = \frac{f_R}{1-f_R}$$

$$\rho_\omega = \frac{0.0369}{1-0.0369} = 0.0383 = 3.83 \%$$

(٩,٤) فاعلية المواد الماصة الذائبة

يُساهم تغير تركيز المواد الماصة للنيوترونات لسائل التبريد والتهديئة في التحكم في المفاعلات، وتُستخدم هذه الطريقة خاصة في مفاعلات الماء. وذلك لطبيعة التوزيع المنتظم للسائل في كل أنحاء قلب المفاعل، الأمر الذي يجعل تغيير تركيز المواد الماصة فيه إحدى أدوات التحكم المثالية والمفيدة لانتظام فيض النيوترونات والقدرة؛ ولهذا يُستخدم تغير تركيز حامض البوريك (H_3BO_3) في سائل التبريد آلياً عند الحاجة لمساعدة قضبان التحكم في مختلف مراحل تشغيل المفاعل.

(٩,٤,١) قدرة التحكم للمواد الماصة الذائبة

إضافة المواد الماصة الذائبة لسائل التبريد لها قدرة محدودة على امتصاص النيوترونات، ولا يمكن استعمالها كبديل لقضبان التحكم؛ لأنها عملية بطيئة، ولا تكفي للتحكم في المفاعل في كل الحالات؛ ولهذا فإن هذه الطريقة تُستعمل خاصة للمحافظة على الحالة الحرجة للمفاعل، وذلك بتعويض الفاعلية السالبة الناتجة عن العناصر السامة مثل الزينون والسمريوم، الناتجة عن استنزاف الوقود. وتتم هذه العملية عادة بتخفيض تدريجي لتركيز المواد الماصة الذائبة في سائل التبريد. أما دور قضبان التحكم فيبقى أساسياً أثناء التغيرات السريعة، مثل بداية التشغيل، والمحافظة على اتزان الفاعلية عند ارتفاع درجة الحرارة، وإخماد المفاعل عند الحاجة.

(٩,٤,٢) فاعلية المواد الماصة الذائبة

تُؤثر إضافة المواد الماصة لسائل التبريد في عامل التضاعف الفعّال (K_{eff}) ومن ثم الفاعلية عن طريق تغير قيمة معامل الاستعمال f ، أما بقية المعاملات الأخرى ($\rho, \epsilon, \eta, \dots$) فتأثرها بوجود تلك المواد الماصة للنيوترونات في قلب المفاعل محدود جداً ولا يكاد يذكر بالنسبة للمفاعلات الحرارية؛ ولهذا تُحسب فاعلية المواد الماصة الذائبة والموزعة بانتظام داخل قلب المفاعل من خلال دراسة تغير معامل الاستعمال، الذي يتناسب في هذه الحالة مع تغير عامل التضاعف، ثم الفاعلية وفق المعادلة الآتية:

$$(٩, ١٦) \quad \rho_w = \frac{K_0 - K}{K} = \frac{f_0 - f}{f}$$

حيث إن :

معامل الاستعمال بدون مواد ماصة :

$$(٩, ١٧) \quad f_0 = \frac{\bar{\Sigma}_{aF}}{\bar{\Sigma}_{ac}}$$

معامل الاستعمال عند إضافة المواد الماصة (B)

$$(٩, ١٨) \quad f = \frac{\bar{\Sigma}_{aF}}{\bar{\Sigma}_{ac} + \bar{\Sigma}_{aB}}$$

علماً أن $\bar{\Sigma}_{aF}$; $\bar{\Sigma}_{aB}$ تمثلان متوسط المقطع العرضي المجهاري للوقود ومادة البورون الماصة للنيوترونات على التوالي. أما متوسط المقطع العرضي المجهاري لقلب المفاعل فيساوي مجموع متوسطات المقاطع المجهرية لمكونات المفاعل (خاصة الوقود والمهدئ) :

$$\bar{\Sigma}_{ac} = \bar{\Sigma}_{aF} + \bar{\Sigma}_{aM}$$

عند تعويض f_0 و f بقيمهما في المعادلة (٩, ١٦) نحصل على معادلة فاعلية المواد

الماصة الذائبة الآتية :

$$(٩, ١٩) \quad \rho_w = \frac{\bar{\Sigma}_{aB} / \bar{\Sigma}_{aM}}{\frac{\bar{\Sigma}_{aF}}{\bar{\Sigma}_{aM}} + 1} = (1 - f_0) \frac{\bar{\Sigma}_{aB}}{\bar{\Sigma}_{aM}}$$

يُفضل عادة تبسيط هذه المعادلة بتعويض نسبة المقاطع المجهرية بقيمة عملية

تحتوي على تركيز المواد الماصة الذائبة (B) الآتية :

$$(٩,٢٠) \quad \frac{\bar{\Sigma}_{aB}}{\bar{\Sigma}_{aM}} = \frac{N_B \cdot \bar{\sigma}_{aB}}{N_M \cdot \bar{\sigma}_{aM}} = \frac{A_M}{A_B} \cdot \frac{\bar{\sigma}_{aB}}{\bar{\sigma}_{aM}} \cdot \frac{m_B}{m_M}$$

$$= \frac{18}{10.8} \cdot \frac{759}{0.66} \cdot C$$

حيث إن :

C : تركيز المادة الماصة الذائبة في سائل التبريد بوحدة الواحد في المليون ($\text{ppm}=10^{-6}$).
وأخيراً، تصبح المعادلة النهائية لفاعلية المادة الماصة الذائبة في سائل التبريد عند تعويض نسبة المقاطع العرضية المجهرية بالقيمة الجديدة على النحو الآتي :

$$(٩,٢١) \quad \rho_{\omega} = 1.92 \times 10^{-3} \times (1 - f_0) \times C$$

مثال :

أوجد تركيز حامض البريك في ماء التبريد الذي يسمح ببقاء المفاعل في الحالة الحرجة عند ائزان الزينون، وذلك بإلغاء تأثير هذه المادة السامة عن طريق المواد الماصة الذائبة في ماء التبريد. علماً أن الفاعلية السالبة الناتجة عن ائزان الزينون تساوي ($\rho_x = -0.026$) ومعامل الاستعمال في بداية التشغيل يساوي ($f_0 = 0.92$).

الحل :

- الحالة الحرجة في بداية التشغيل :

$$\rho = 0 \quad ; \quad f_0 = 0.92$$

- الحالة الحرجة عند ائزان الزينون :

$$\rho = 0 \Rightarrow \rho_{\omega} = |\rho_x|$$

$$\rho_{\omega} = 1.92 \times 10^{-3} \times (1 - f_0) \times C_B = 0.026$$

$$\Rightarrow C_B = \frac{0.026 \times 10^3}{1.92(1 - 0.92)} = 169.3 \text{ ppm}$$

- تركيز حامل البريك في ماء التبريد:

$$C(H_3BO_3) = \frac{A(H_3BO_3)}{A_B} C_B = \frac{61.8}{10.8} \times 169.3$$

$$= 968.77 \text{ ppm} \approx 1 \text{ g / litre}$$

ملاحظة:

تجدر الإشارة إلى أن تركيز حامض البريك في ماء التبريد لمفاعل الماء (PWR) يتناقص تدريجياً من بداية التشغيل حتى نهاية مدة بقاء الوقود في المفاعل. وعلى الرغم من أن كمية البورون قليلة، إلا أنها فعالة للتخلص من التأثيرات البطيئة، مثل استنزاف الوقود، وتراكم المواد السامة.

(٩،٥) معادلات التحكم في المفاعل

أثناء تشغيل المفاعل تتلخص عملية التحكم في التدخل بفعل شيء ما يؤدي إلى ردة فعل معينة للنظام أي المفاعل. والمثال على ذلك هو إدخال كمية معينة من الفاعلية عن طريق تحريك قضبان التحكم فينتج عن ذلك زيادة أو نقصان في قدرة المفاعل حسب كمية وإشارة الفاعلية. ولتسهيل البرمجة للتحكم الآلي في تحريك قضبان التحكم، يجب البحث عن المعادلات الرياضية التي تربط بين الفاعلية وقدرة المفاعل؛ ولهذا يجب كتابة معادلات ديناميكا المفاعل والعمل على اختصارها قدر الإمكان بدون المساس بالعوامل المؤثرة الأساسية. ويكتب عادة نظام معادلات ديناميكا المفاعل على النحو الآتي:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Delta} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (٩،٢٢)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Delta} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad i = 1.2...6$$

حيث إن :

$$\frac{l}{k} = (v \nu \Sigma_F)^{-1} = \Delta$$

$\rho(t)$: الفاعلية.

$n(t)$: كثافة النيوترونات.

تمثل المعادلة الثانية في النظام السابق تركيز النظائر المشعة المولدة للنيوترونات المتأخرة. يمكن كتابة هذه المعادلة بصيغة تكاملية ثم إدماجها في المعادلة الأولى مما يمكننا من اختصار عدد المعادلات.

$$\begin{aligned} C_i(t) &= \int_{-\infty}^t \frac{\beta_i}{\Delta} n(t') \cdot \exp[-\lambda_i(t-t')] dt' \\ (9, 23) \quad &= \int_0^{\infty} \frac{\beta_i}{\Delta} \exp(-\lambda_i \tau) \cdot n(t-\tau) d\tau \end{aligned}$$

عند تعويض تركيز النظائر المشعة بهذه القيمة في المعادلات الأولى لنظام معادلات ديناميكا المفاعل واستبدال كثافة النيوترونات بالقدرة نحصل على معادلة قدرة المفاعل بدلالة الفاعلية على النحو الآتي :

$$(9, 24) \quad \frac{dP}{dt} = \left[\frac{\rho(t) - \beta}{\Delta} \right] \cdot P(t) + \frac{\beta}{\Delta} \cdot \int_0^{\infty} D(\tau) \cdot P(t-\tau) d\tau$$

حيث إن :

$D(\tau)$: احتمال إصدار النيوترونات المتأخرة في الفترة الزمنية τ التي تفرق بين حدوث الانشطار وإصدار النيوترونات المتأخرة.

$$(9, 25) \quad D(\tau) = \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i \lambda_i}{\beta} \cdot e^{-\lambda_i \tau}$$

يُفضل أحياناً حساب الفاعلية بدلالة قدرة المفاعل التي يمكن استنتاجها من المعادلة السابقة (٩, ٢٤) لنحصل على ما يلي :

$$(٩,٢٦) \quad \rho(t) = \beta + \Delta \frac{d}{dt} [Ln(P(t))] - \beta \cdot \int_0^{\infty} D(\tau) \frac{P(t-\tau)}{P(t)} d\tau$$

تجدر الإشارة إلى أن المعادلتين (٩,٢٤) و (٩,٢٦) تمثلان أساس معادلات التحكم في المفاعلات النووية ، وذلك لحساب تفاعل النظام عند تغير الفاعلية والقدرة.

(٩,٥,١) تحويل لبلاس لحل المعادلات التفاضلية

يُستعمل تحويل لبلاس في الكثير من المجالات الهندسية لحل المعادلات التفاضلية - التكاملية التي عادة ما يصعب حلها ، وذلك بتحويلها إلى معادلات جبرية يسهل حلها.

(٩,٥,١,١) خطوات تحويلات لبلاس

يتلخص تحويل لبلاس للمعادلات التفاضلية إلى معادلات جبرية يسهل حلها باستعمال الطرائق الرياضية المعتادة. بعد ذلك يتم تحويل لبلاس العكسي لتلك الحلول للحصول على المعادلات الأصلية المنشودة. وتوجد جداول لتحويل لبلاس لمعظم الدوال الرياضية المشهورة ؛ ويُعرف هذا التحويل بشكل عام بالمعادلة الآتية :

$$(٩,٢٧) \quad \mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-st} dt = f(s)$$

حيث إن :

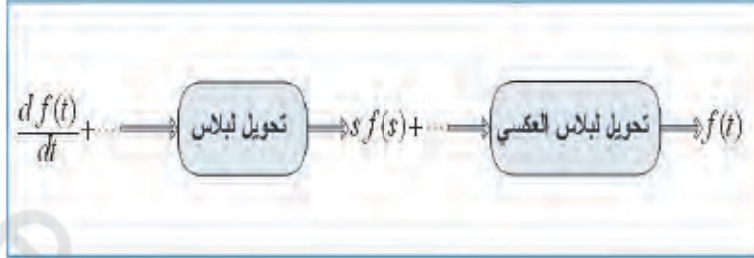
$f(s)$: دالة تحويل لبلاس لدالة الزمن $f(t)$ ، علماً أن المتغير s يمثل الرقم

التخيلي الآتي :

$$S = a + ib \quad ; \quad i = \sqrt{-1}$$

يُوضح الشكل رقم (٩,٦) أهم خطوات طريقة تحويلات لبلاس لحل المعادلات

التفاضلية.



الشكل رقم (٦، ٩). أهم خطوات تحويلات لبلاس.

مثال :

استعمل طريقة تحويلات لبلاس لحل المعادلة التفاضلية الخاصة بكثافة النيوترونات الانشطارية الفورية فقط باعتبار أن المفاعل مستقر وإهمال النيوترونات

$$\frac{dn(t)}{dt} - \frac{\rho}{\Delta} n(t) = 0 \quad ; \quad n(0) = n_0$$

الحل :

أولاً : تحويل لبلاس للمعادلة التفاضلية الأصلية :

$$s n(s) - n(0) - \frac{\rho}{\Delta} n(s) = 0$$

ثانياً : حل هذه المعادلة الجبرية :

$$n(s) = n_0 \cdot \frac{1}{s - (\frac{\rho}{\Delta})}$$

ثالثاً : تحويل لبلاس العكسي للحل :

$$n(t) = n_0 \times \mathcal{E}^{-1} \left[\frac{1}{s - \frac{\rho}{\Delta}} \right] = n_0 \cdot \exp\left(\frac{\rho \cdot t}{\Delta}\right)$$

(٩, ٥, ١, ٢) دالة التحويل

تُعرف دالة التحويل في العديد من المجالات بأنها تعبير رياضي عن تأثير المعلومة، أو الإشارة الخارجة من نظام فيزيائي، مقارنةً بالمعلومة، أو الإشارة الداخلة في النظام. وتُكتب دالة التحويل بشكل عام وفق المعادلة الآتية:

$$(٩, ٢٨) \quad Z(s) = \frac{\mathcal{L}[f_0(t)]}{\mathcal{L}[f_i(t)]} = \text{دالة التحويل}$$

حيث إن:

$f_i(t)$: دالة الإشارة (المعلومة) الداخلة في النظام (السبب).

$f_0(t)$: دالة الإشارة (المعلومة) الخارجة من النظام (التأثير).

تؤدي معرفة دالة التحويل، $Z(s)$ سواء عن طريق القياس أو التحليل الرياضي إلى معرفة خصائص النظام واستقراره؛ وذلك لأن معرفة هذه الدالة تؤدي إلى معادلة النظام الآتية:

$$(٩, ٢٩) \quad f_0(s) = Z(s)f_i(s)$$

(٩, ٥, ٢) دالة تحويل قدرة الصفر للمفاعل

عندما نبحث عن تغير القدرة مع الزمن لمفاعل مستقر نتيجة تغير بسيط في الفاعلية يجب حل معادلة المفاعل (٩, ٢٤) واعتبار أن قدرة المفاعل الجديدة تصبح كما يلي:

$$(٩, ٣٠) \quad P(t) = P_0 + P_1(t) \quad ; \quad t > 0$$

حيث إن:

P_0 : قدرة المفاعل عند حالة الاستقرار ($t=0$)

$P_1(t)$: القدرة الإضافية نتيجة إدخال كمية الفاعلية، $\rho(t)$

وعند تعويض $P(t)$ بهذه القيمة في المعادلة (٩,٢٤) وإهمال القيمة $P_1(t) \times \rho(t)$ لصغرها أمام $P_0 \times \rho(t)$ ومع القليل من الترتيب نحصل على المعادلة الآتية:

$$(٩,٣١) \quad \frac{dP_1(t)}{dt} = P_0 \frac{\rho(t)}{\Delta} + \frac{\beta}{\Delta} \cdot \int_0^{\infty} D(\tau) [P_1(t-\tau) - P_1(t)] d\tau$$

يُفضل عادة حل هذا النوع من المعادلات عن طريق تحويل لبلاس، وعند استعمال قاعدة الضرب الآتية:

$$(٩,٣٢) \quad \int_0^{\infty} f(\tau) \cdot g(t-\tau) d\tau = f(s) \cdot g(s)$$

نحصل على تحويل لبلاس للمعادلة (٩,٣١) على النحو الآتي:

$$(٩,٣٣) \quad s \cdot P_1(s) = \frac{P_0}{\Delta} \rho(s) + \frac{\beta}{\Delta} [D(s) \cdot P_1(s)] - \frac{\beta}{\Delta} \cdot P_1(s)$$

علماً أن مجموع احتمالات إصدار النيوترونات المتأخرة تساوي الواحد الصحيح وفق المعادلة الآتية:

$$(٩,٣٤) \quad \int_0^{\infty} D(\tau) d\tau = 1$$

أما الدالة $D(s)$ فتمثل تحويل لبلاس للدالة $D(\tau)$ المعرفة سابقاً (٩,٢٥).

$$(٩,٣٥) \quad D(s) = \mathcal{L} \left[\sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i \lambda_i}{\beta} \cdot \exp(-\lambda_i \tau) \right] = \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i \lambda_i}{\beta} \cdot \frac{1}{s + \lambda_i}$$

يُمكن أيضاً كتابة تحويل لبلاس للمعادلة الأصلية (٩,٣١) باستعمال دالة التحويل لتصبح على النحو الآتي:

$$(٩,٣٦) \quad P_1(t) = P_0 Z(s) \rho(s)$$

تُعتبر دالة التحويل، $Z(s)$ عن استجابة النظام (المفاعل) بسبب إدخال الفاعلية، $p(t)$. وعندما تكون قدرة المفاعل قريبة من الصفر، فهذه الدالة تسمى دالة تحويل قدرة الصفر للمفاعل، P_0 . ويمكن في هذه الحالة اشتقاق $Z(s)$ رياضياً بين المعادلة (٩,٣٣) والمعادلة (٩,٣٦) لنحصل على ما يلي:

$$(٩,٣٧) \quad Z(s) = \frac{1}{s} \left[\Delta + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{s + \lambda_i} \right]^{-1}$$

وأخيراً، لمعرفة التغير النسبي لقدرة المفاعل مع الزمن نتيجة إدخال كمية الفاعلية البسيطة $p(t)$ نقوم بتحويل لبلاس العكسي للمعادلة (٩,٢٤) واستعمال قاعدة الضرب فنحصل على النتيجة الآتية:

$$(٩,٣٨) \quad \begin{aligned} \frac{P_1(t)}{P_0} &= \int_0^t Z(t-\tau) \rho(\tau) d\tau = \mathcal{L}^{-1}[Z(s)] \\ &= \frac{1}{\Delta} + \sum_{j=2}^7 \frac{e^{s_j \times t}}{s_j \left[\Delta + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta \lambda_i}{(s_j + \lambda_i)^2} \right]} \end{aligned}$$

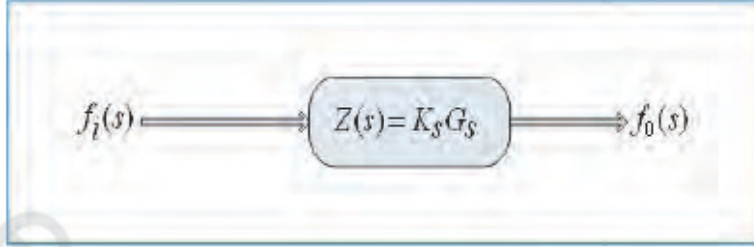
حيث إن:

s_j : جذور معادلة الفاعلية $Y(s) = 0$ التي تم شرحها في الفصل السابع، ونذكر أن هذه الدالة لها المعادلة الآتية:

$$(٩,٣٩) \quad Y(s) = \rho_0 - s \left(\Lambda + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{s + \lambda_i} \right)$$

(٩,٥,٣) دائرة التحكم المفتوحة

يوضح الشكل رقم (٩,٧) دائرة التحكم المفتوحة بشكل عام، وتستعمل هذه الدائرة في الكثير من المجالات، ولا تقتصر على الهندسة النووية فقط.



الشكل رقم (٩,٧). دائرة التحكم المفتوحة.

(٩,٥,٣,١) دالة تحويل الدائرة المفتوحة

تُعرف دالة تحويل الدائرة المفتوحة وفق التعريف السابق لهذه الدالة بالمعادلة الآتية :

$$(٩,٤٠) \quad Z(s) = \frac{\mathcal{L}[f_o(t)]}{\mathcal{L}[f_i(t)]} = K_s G_s$$

حيث إن :

K_s : ثابت خاص بالنظام.

G_s : معامل كسب النظام الذي يُعرف أيضاً بدالة تحويل قدرة الصفر، $G(s)$

التي لها متغير تخيلي وفق المعادلة الآتية :

$$(٩,٤١) \quad G_s = G(s) = x + iy \quad ; \quad (i = \sqrt{-1})$$

(٩,٥,٣,٢) استجابة المفاعل لفاعلية جيبيّة

نبحث الآن استجابة المفاعل عند إدخال فاعلية جيبيّة، وذلك إثر تحرك ترددي

لأحد قضبان التحكم مثلاً باعتبار أن الدائرة مفتوحة. وفي هذه الحالة تكون دالة

الفاعلية الداخلة للنظام على النحو الآتي :

$$(٩,٤٢) \quad \rho(t) = \rho_0 \sin(\omega t)$$

حيث إن :

$$2\pi f = w, \text{ علماً أن } f(Hz) \text{ يساوي تردد الحركة (تردد في الثانية).}$$

وتتمثل استجابة النظام (المفاعل) نتيجة إدخال هذه الفاعلية في تغير قدرة المفاعل مع الزمن. ويُحسب هذا التغير بحل معادلة ديناميكا المفاعل (٩,٢٤) عن طريق تحويل لبلاس كما سبق شرحه لنحصل على ما يلي :

$$(٩,٤٣) \quad P(s) = P_0 Z(s) \rho(s)$$

حيث إن :

$Z(s)$: دالة التحويل السابقة (دالة تحويل قدرة الصفر).

$\rho(t)$: تحويل لبلاس لدالة الفاعلية، علماً بأن :

$$(٩,٤٤) \quad \rho(s) = \frac{\rho_0 \cdot \omega}{s^2 + \omega^2} = \frac{\rho_0 \cdot \omega}{(s + i\omega)(s - i\omega)}$$

يُمكن حل هذه المسألة النهائي في تحويل لبلاس العكسي للمعادلة (٩,٤١)، الذي يُكتب حينئذ على النحو الآتي :

$$(٩,٤٥) \quad P(t) = P_0 \rho_0 [(Z(i\omega) | \sin(\omega t + \phi)) + \omega \sum_{j=1}^6 \frac{e^{s_j \times t}}{(\omega^2 + s_j^2)(dY/ds)_{s_j}}]$$

حيث إن :

s_j : جذور المعادلة الفاعلية.

Φ : زاوية الطور (زاوية تأخر الاستجابة).

$$(٩,٤٦) \quad \phi = \text{Arg} \left\{ \frac{\text{Im}[Z(i\omega)]}{\text{Re}[Z(i\omega)]} \right\}$$

نلاحظ أن الجزء الأخير من المعادلة (٩,٤٥) ناتج عن قطب الدالة $Z(s)$ المتمثل في معادلة الفاعلية $Y(s) = 0$. وبعد فترة من الزمن يبقى فقط الجذر $s_1 = 0$ مما يجعل هذا الجزء يتلاشى تدريجياً ليصبح التغير النسبي لقدرة المفاعل على النحو الآتي:

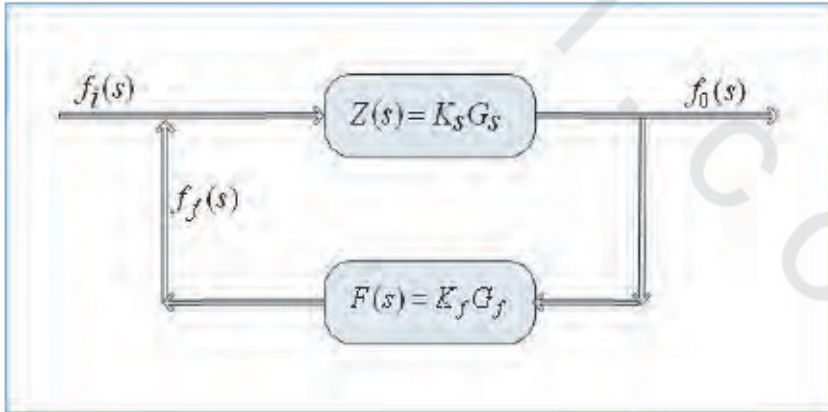
$$\frac{P(t)}{P_0} \approx \rho_0 [|Z(i\omega)| \cdot \sin(\omega t + \phi)] + \frac{1}{\omega \cdot \Delta} \quad (٩,٤٧)$$

$$t \rightarrow \infty$$

تجدر الإشارة إلى أن إدخال فاعلية على شكل جيبي في هذه الحالة يؤدي إلى إجابة غير متماثلة تماماً؛ ذلك لأن استجابة قدرة المفاعل لها التردد نفسه، لكن زاوية الطور متأخرة بمقدار Φ .

(٩,٥,٤) دائرة التحكم المغلقة

يوضح الشكل رقم (٩,٨) دائرة التحكم المغلقة بشكل عام. وتستعمل هذه الدائرة أيضاً في الكثير من المجالات، كما هو الحال بالنسبة لدائرة التحكم المفتوحة السابقة.



الشكل رقم (٩,٨). دائرة التحكم المغلقة [١٣].

(٩, ٥, ٤, ١) دالة تحويل الدائرة المغلقة

تُعرف دالة تحويل دائرة التحكم المغلقة وفق التعريف السابق بالمعادلة الآتية :

$$(٩, ٤٨) \quad L(s) = \frac{f_0(s)}{f_i(s)} = \frac{K_s G_s}{1 + (K_s G_s)(K_f G_f)}$$

حيث إن :

$$\frac{f_0}{f_i(s) - f_f(s)} = K_s G_s : \text{مساهمة النظام ، علماً أن } f_i(s) \text{ تمثل تحويل لبلاس}$$

لدالة الارتداد.

$$\frac{f_f(s)}{f_0(s)} = K_f G_f : \text{مساهمة عملية الارتداد لوحدها.}$$

(٩, ٥, ٤, ٢) دائرة التحكم المغلقة للمفاعل

لقد شرحنا في الفصل السابق أهمية معامل الفاعلية لتغير درجة الحرارة في سلامة المفاعل ، وبيّنا أن هذا المعامل يجب أن يكون سالباً لكي يحد من قدرة المفاعل عند ارتفاع درجة الحرارة. وسندرس الآن دالة التحويل الخاصة بدورة التحكم المغلقة التي تحتوي على ارتداد للفاعلية نتيجة ارتفاع درجة حرارة الوقود بسبب إدخال كمية من الفاعلية ؛ ولهذا الغرض نفترض أن المفاعل مستقر قبل إضافة تغير بسيط للفاعلية خارجياً. وفي هذه الحالة ، تؤدي هذه التغيرات في الفاعلية إلى زيادة أو نقصان في التفاعلات داخل الوقود ، ومن ثم تغيرات في درجة حرارة الوقود التي يحكمها القانون الآتي :

$$(٩, ٤٩) \quad \frac{dT_F(t)}{dt} = a P_1(t) - \omega_F T_F(t)$$

حيث إن :

$$P_1(t) : \text{التغير الناتج في القدرة} ; P_1(t) = P(t) - P_0 \quad ; \quad t > 0$$

a : ثابت خاص بالسعة الحرارية وكثافة الوقود.

ω_F : عكس ثابت الزمن لانتقال الحرارة في الوقود.

تُحسب الفاعلية الإجمالية لدورة التحكم المغلقة في هذه الحالة وفق المعادلة الآتية :

$$(٩,٥٠) \quad \rho(t) = \rho_{ex}(t) + \rho_f(t)$$

حيث إن :

$\rho_{ex}(t)$: الفاعلية الخارجية الناتجة عن تحرك قضبان التحكم.

$\rho_f(t)$: الفاعلية المرتدة الناتجة عن تغير درجة الحرارة الوقود، علماً أن :

$$(٩,٥١) \quad \rho_f(t) = \int_0^t f_f(\tau) P_1(t-\tau) d\tau$$

عند الأخذ بهذه الحسابات وتعويض ما يلزم في معادلة ديناميكا المفاعل (٩,٢٤) نحصل على معادلة دائرة التحكم المغلقة للمفاعل الآتية :

$$(٩,٥٢) \quad \frac{dP_1(t)}{dt} = \frac{1}{\Delta} [\rho(t) + \int_0^t f_f(\tau) P_1(t-\tau) d\tau] \cdot [P_0 + P_1(t)] d\tau \\ + \frac{\beta}{\Delta} \int_0^t D(\tau) [P_1(t-\tau) - P_1(t)] d\tau$$

هذه المعادلة العامة غير خطية ، ولجعلها كذلك نفترض أن التغير في القدرة بسيط $(P(t) \ll P_0)$ مما يسمح بكتابتها من جديد على النحو الآتي :

$$(٩,٥٣) \quad \frac{dP_1(t)}{dt} = \frac{P_0}{\Delta} \rho(t) \\ + \frac{1}{\Delta} \int_0^t [\beta \cdot D(\tau) + P_0 \cdot f_f(\tau)] \times P_1(t-\tau) d\tau - \frac{\beta}{\Delta} \cdot P_1(t)$$

يُمكن الآن حل هذه المعادلة باستعمال طريقة تحويل لبلاس كما سبق شرحه ، فنحصل على ما يلي :

$$(٩,٥٤) \quad sP_1(s) = \frac{P_0}{\Delta} \rho(s) + \frac{\beta}{\Delta} \cdot D(s) \cdot P_1(s) + \frac{P_0}{\Delta} \cdot F(s) \cdot P_1(s) - \frac{\beta}{\Delta} \cdot P_1(s)$$

وعند استعمال دوال التحويل لدائرة التحكم المغلقة تُكتب هذه المعادلة على النحو الآتي :

$$(٩,٥٥) \quad P_1(t) = P_0 \cdot \left[\frac{Z(s)}{1 - P_0 \cdot F(s) \cdot Z(s)} \right] \cdot \rho(s) = P_0 \cdot L(s) \cdot \rho(s)$$

حيث إن :

$Z(s)$: دالة التحويل السابقة لقدرة الصفر.

$F(s)$: دالة التحويل المرتدة.

ويُلاحظ أن $Z(s) \leftarrow L(s)$ عندما تؤول قدرة استقرار المفاعل إلى الصفر ($P_0 \rightarrow 0$) ، يؤدي تحويل لبلاس العكسي للمعادلة (٩,٤٨) إلى معرفة التغير النسبي لقدرة المفاعل مع الزمن بسبب إضافة الفاعلية الخارجية والمرتدة. وباستعمال قاعدة الضرب نحصل على التحويل العكسي الآتي :

$$(٩,٥٦) \quad \frac{P_1(t)}{P_0} = \int_0^t l(t-\tau) \cdot \rho_{ex}(\tau) d\tau$$

حيث إن :

$\mathcal{L}[L(s)] = l(t)$ تحويل لبلاس العكسي لدالة التحويل $L(s)$.

(٩,٥,٤,٣) استجابة المفاعل لفاعلية جيبيّة

ندرس الآن المثال السابق الخاص بمفاعل مستقر تحت تأثير فاعلية تحرك ترددي لأحد قضبان التحكم ، لكن في هذه المرة نعتبر دائرة التحكم مغلقة. وهكذا يصبح التأثير ناتجاً عن الفاعلية الخارجية والفاعلية المرتدة بسبب تغير درجة حرارة الوقود.

$$(٩,٥٧) \quad \begin{aligned} \rho(t) &= \rho_{ex}(t) + \rho_f(t) \\ &= \rho_0 \sin(\omega t) + \alpha_f T_F(t) \end{aligned}$$

حيث إن :

α_T : معامل الفاعلية لتغير درجة الحرارة.

$T_F(t)$: دالة درجة حرارة الوقود.

عند تعويض $p(t)$ بهذه القيمة في معادلة ديناميكا المفاعل (٩,٥٣) وحلها عن طريق تحويل لبلاس ، كما سبق شرحه باستعمال دوال التحويل ، نحصل على المعادلة الآتية :

$$(٩,٥٨) \quad \frac{P_1(s)}{P_0} = \frac{Z(s)}{1 - F(s).Z(s)} = L(s).p_{ex}(s)$$

حيث إن :

$Z(s)$: دالة تحويل قدرة الصفر.

$F(s)$: دالة التحويل المرتدة الناتجة عن تغير درجة الحرارة التي أُشتقت من المعادلة (٩,٤٩) والمعادلة (٩,٥٧).

$$(٩,٥٩) \quad F(s) = \rho_f . P_1(s) = \frac{a . \alpha_F}{\omega_F + s}$$

ويكمنُ الحل النهائي لهذه المسألة في حساب تحويل لبلاس العكسي للمعادلة (٩,٥٨) باستعمال قاعدة الضرب للحصول على التغير النسبي لقدرة المفاعل مع الزمن كما يلي :

$$(٩,٦٠) \quad \frac{P_1(t)}{P_0} = \int_0^t l(t-\tau) . p_{ex}(\tau) d\tau$$

بعد الفترة الانتقالية السريعة تصبح استجابة المفاعل لها تردد الفاعلية الخارجية نفسها ، w لكن متأخرة بزاوية الطور ، Φ كما هو واضح في معادلة الحل الآتية :

$$(٩,٦١) \quad \begin{aligned} \frac{P_1(t)}{P_0} &= |L(i\omega)| . \sin(\omega t + \phi) \\ t &\rightarrow \infty \\ \phi &= \text{Arg} [L(i\omega)] \end{aligned}$$

(٩, ٥, ٤, ٤) تحليل الاستقرار الخطي للمفاعل

يعتمد استقرار المفاعل على قيم جذور دالة التحويل التي تقتصر على جذور البسط بالنسبة لدائرة التحكم المغلقة ؛ ولهذا يجب فقط حل المعادلة الآتية :

$$(٩, ٦٣) \quad 1 - F(s) \cdot Z(s) = 0$$

تُوجد طرائق بيانية متعددة في مجال نظرية التحكم الخطي للحصول على جذور هذه المعادلة. لكن عند إضافة بعض الافتراضات الواقعية، مثل إهمال قيمة عمر دورة النيوترونات، Δ لصغرها أمام S واعتماد مجموعة واحدة للنيوترونات المتأخرة، يمكن حساب جذور المعادلة (٩, ٦٢) رياضياً والحصول على الجذور التالية :

$$(٩, ٦٤) \quad s_{\pm} = \frac{1}{2} \omega_F \left(\frac{P_0 \cdot A_F}{\beta} - 1 \right) \cdot \left[1 \pm \sqrt{1 + \frac{4 \cdot N_F}{M_F}} \right]$$

حيث إن :

$$\begin{aligned} A_F &= \frac{a \times \alpha_F}{w_F} \\ N_F &= \frac{P_0 \times A_F}{\beta} \left(\lambda / w_F \right) \\ M_F &= \left(\frac{P_0 \times A_F}{\beta - 1} \right)^2 \end{aligned}$$

إذا كان معامل الفاعلية لتغير درجة الحرارة موجباً ($A_F \approx \alpha_F > 0$) نلاحظ أن الجزء تحت الجذر في المعادلة السابقة يكون موجباً وأكبر من الواحد، مما يجعل أحد الجذور موجباً والآخر سالباً. وهذه الحالة يجب تفاديها لأنها تؤدي إلى عدم استقرار المفاعل (تزايد في القدرة بلا حدود). لكن عندما يكون معامل الفاعلية لدرجة الحرارة سالباً ($\alpha_F < 0$)، فإن الأجزاء الحقيقية لكلا الجذرين S يكون سالباً، مما يؤدي إلى استقرار المفاعل بسبب الفاعلية المرتدة التي تجعل حداً للتزايد الأسّي لقدرة المفاعل عند ارتفاع درجة حرارة الوقود.

(٩,٦) تمارين

- ١- اذكر أهم أدوات التحكم في المفاعل ، وأعطِ مثالاً لكل منها.
- ٢- اشرح دور قضبان التحكم وأفضل طريقة لتوزيعها داخل المفاعل. ولماذا؟
- ٣- وضح قدرة التحكم للمواد الماصة للنيوترونات في المبرد ودورها في عملية التحكم في المفاعل.

- ٤- ارسم شكلاً يوضح كلاً من دورة التحكم المفتوحة ودورة التحكم المغلقة.
- ٥- ما أفضل الطرائق الرياضية لحل دوائر التحكم ، موضحاً أهم خطوات هذه الطريقة؟

٦- يحتوي مفاعل نووي للماء المضغوط PWR على عشرين مجموعة من أقلام الوقود، داخل كل منها قضيب تحكم أسطوانى الشكل، ارتفاعه يساوي ارتفاع قلب المفاعل. الفاعلية لكل قضيب تحكم عند إدخاله تماماً في قلب المفاعل تساوي $p_w(H) = -2\%$ ، فاحسب ما يلي :

- أ) الفاعلية الناتجة عن إدخال قضيب واحد للتحكم مسافة ثلاثة أمتار.
- ب) المسافة اللازمة لإدخال متساو لكل قضبان التحكم لإخماد المفاعل.
- ٧- عند بداية تشغيل مفاعل نووي للماء المغلي (BWR) كان معامل الاستعمال الحراري $f_o = 0.92$ وتركيز حامض البريك (H_3BO_3) في ماء التبريد لمعالجة تراكم المواد السامة يساوي $2g/liter$. علماً أن الفاعلية السالبة عند اتزان الزينون والسمريوم تساوي $p_x = -0.026$ و $p_{sm} = -0.0046$ على التوالي، فاحسب ما يلي :

- أ) كمية حامض التبريد اللازم سحبها من ماء التبريد عند اتزان الزينون.
- ب) الكمية الإضافية اللازم سحبها من ماء التبريد مجدداً عند اتزان السمريوم.
- ج) تركيز حامض البريك في ماء التبريد بعد فترة اتزان كل من الزينون والسمريوم.

٨- عند بداية تشغيل مفاعل نووي للماء المضغوط (PWR) ترفع قضبان التحكم تدريجياً فيصل المفاعل إلى قدرة الصفر ثم مستوى القدرة المطلوبة، وأثناء هذه العملية وجد أن معامل الفاعلية لتغير درجة حرارة الوقود والمهدئ من قدرة الصفر إلى قدرة التشغيل المطلوبة تساوي تنالياً:

$$\alpha_F = -1.0 \times 10^{-5} \frac{\Delta k}{k} / ^\circ C$$

$$\alpha_M = -2.0 \times 10^{-4} \frac{\Delta k}{k} / ^\circ C$$

فاحسب في هذه الحالة ما يلي:

- أ) الفاعلية المرتدة الناتجة عن ارتفاع درجة حرارة الوقود من $275^\circ C$ إلى $650^\circ C$.
- ب) الفاعلية المرتدة الناتجة عن ارتفاع درجة حرارة المهدئ من $275^\circ C$ إلى $300^\circ C$.
- ج) إجمالي الفاعلية المرتدة، ثم كيفية معالجتها للمحافظة على مستوى القدرة المطلوب.

٩- أثناء إخماد المفاعل النووي للحالات الطارئة يتم إدخال كل قضبان التحكم بسرعه في قلب المفاعل ويمكن في اللحظات الأولى من هذه العملية افتراض أن النيوترونات المتأخرة تبقى ثابتة وتساوي:

$$\sum_1^6 \lambda_i C_i(0) = \frac{\beta}{\Delta} P_0$$

لكن على الرغم من سرعة هذه العملية، فإن الفاعلية غير ثابتة وتتغير مع الزمن وفق الدالة $p(t) = -\gamma t$ وفي هذه الحالة اكتب ما يلي:

- أ) معادلة ديناميكا المفاعل أثناء اللحظات الأولى لإخماد المفاعل.
- ب) حل هذه المعادلة بطريقة لبلاس للحصول على تغير قدرة المفاعل في اللحظات الأولى من إخماد المفاعل.

- ١٠- أثناء القفزة الفورية لفاعلية مفاعل نووي مستقر، الناتجة عن تأثير خارجي ($\rho_{\text{ex}} < \beta$)، يفترض أن تأثير النيوترونات المتأخرة ثابت، حيث إن $C(0) = \frac{\beta}{\lambda \Delta} P_0$ ، علماً أن ارتداد الفاعلية نتيجة الارتفاع المفاجئ لدرجة حرارة الوقود يساوي $\rho_f(t) = \alpha_f T(t)$ ، فاكتب ما يلي.
- أ) معادلة ديناميكا المفاعل أثناء اللحظات الأولى للتدخل مع الأخذ بالحسبان لارتداد الفاعلية.
- ب) حل هذه المعادلة بطريقة لبلاس (دائرة مغلقة) للحصول على تغير قدرة المفاعل في اللحظات الأولى للتدخل الخارجي.