

محطات التوليد وطرق الحماية

التحكم في المولدات الكهربائية

مقدمة

يعتبر المولد الكهربائي أحد الأجزاء الرئيسة في عملية إنتاج وتوليد القدرة الكهربائية. ويمكننا القول بأن جملة القدرة الكهربائية المنتجة عالمياً تتم عن طريق المولدات التزامنية. ولذا فإن المولد هو أهم عنصر في نظام توليد القدرة الكهربائية. وسوف نتناول في هذه الوحدة مراجعة لمعرفة أنواع المولدات التزامنية وكيفية التحكم في الجهد والتردد وذلك من خلال العناصر التالية:

١. الأنواع الرئيسة لمولدات القدرة التزامنية.
٢. الأجزاء الرئيسة لمولدات القدرة التزامنية.
٣. مصادر تغذية الأقطاب.
٤. توليد موجات القوة الدافعة الكهربائية الخاصة بالعضو الثابت.
٥. الدائرة المكافئة للمولدات التزامنية.

كما سوف نتناول في هذه الوحدة الشروط اللازمة والواجب توافرها لربط المولد مع الشبكة بما يسمى ربط المولد على القضبان اللانهائية. وكذلك سلوك المولدات التزامنية المتصلة بالقضبان اللانهائية وذلك من خلال العناصر التالية:

- ١- الشروط اللازمة لربط محطة المولد مع الشبكة الكهربائية.
 - ٢- ربط محطة التوليد مع الشبكة الكهربائية بطريقة المصاييح المضيئة.
 - ٣- ربط محطة التوليد مع الشبكة الكهربائية بواسطة منظار التزامن.
 - ٤- دراسة سلوك المولدات التزامنية المتصلة بالقضبان اللانهائية.
 - ٥- الاختلاف في سلوك المولدات التزامنية المتصلة بالقضبان اللانهائية والمولدات غير المتصلة.
- بالإضافة إلى ما سوف نتناوله في هذه الوحدة من دراسة للقدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة وكيفية التحكم في قيم تلك القدرة المتولدة وذلك من خلال العناصر التالية:

- ١- إنتاج القدرة في محطات التوليد.
- ٢- التحكم في القدرة الفعالة للمولد.
- ٣- التحكم في القدرة غير الفعالة للمولد.
- ٤- ملخص حالات التشغيل.

الوحدة الثانية : التحكم في المولدات الكهربائية

تستخدم مولدات القدرة في محطات توليد الطاقة الكهربائية وتعرف باسم المولدات التزامنية لأنها من الآلات القابلة للانعكاس (أي يمكن تشغيلها كمحركات أو مولدات).

وتوضع الملفات المنتجة للقدرة الكهربائية (المنتج) في الآلات التزامنية على العضو الثابت وذلك في حالة المولدات متوسطة وكبيرة القدرة. ويحمل العضو الدوار ملفات المجال المغناطيسي للمولدات التزامنية متوسطة وكبيرة القدرة. أما المولدات صغيرة القدرة فتكون مثل آلات التيار المستمر فيكون المنتج هو العضو الدوار بينما توضع ملفات المجال المغناطيسي على العضو الثابت في حالة المولدات التزامنية الصغيرة.

ويتم التحكم في جهد وتردد المولد بحيث يتم ربطه مع الشبكة الرئيسية وفقا للشروط التي سوف نتناولها.

كما سنوضح كيفية التحكم في القدرة الفعالة وكذلك القدرة غير الفعالة للمولدات التزامنية.

٢- ١ الأنواع الرئيسية لمولدات القدرة التزامنية؛

٢- ١ - ١ تقسم المولدات التزامنية على حسب؛

١. المحرك الأولي المستخدم: ويقصد بها التوربينة المستخدمة لتحويل الطاقة الأولية المخزنة (الوقود أو الماء أو الهواء أو الشمس ... إلخ) إلى طاقة ميكانيكية لإدارة العضو الدوار للمولد والتي يمكن تقسيمها إلى الأنواع التالية:

- مولدات تعمل على توربينات بخارية
- مولدات تعمل على توربينات غازية
- مولدات تعمل على توربينات هيدروليكية
- مولدات تعمل على الاحتراق الداخلي (الديزل)
- مولدات تعمل على تحويل الطاقة الجديدة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح إلى طاقة كهربائية.

٢. تقسم المولدات على حسب تردد القوة:

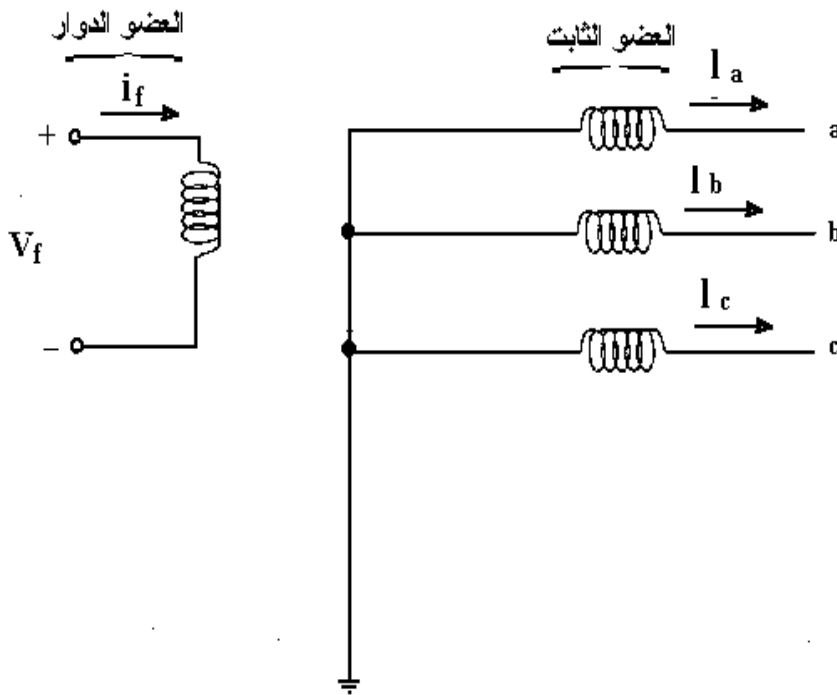
تردد القوة الدافعة الكهربائية المتولدة والتي يمكن تقسيمها إلى الأنواع التالية:

- مولدات تعمل على تردد ٦٠ ذبذبة في الثانية.
- مولدات تعمل على تردد ٥٠ ذبذبة في الثانية.

ويختلف التردد الناشئ باختلاف سرعة الدوران للتوربينة واختلاف عدد الأقطاب المولدة للمجال المغناطيسي.

٢-٢ الأجزاء الرئيسة لمولدات القدرة التزامنية

تتركب المولدات المتزامنة كما في الشكل (٢-١) من الأجزاء الرئيسة التالية:



شكل (٢-١) المكونات الأساسية لمولد القدرة

٢ - ٢ - ١ العضو الدوار:

يتكون عادة من شكل أسطواناني وتوضع عليه ملفات المجال والتي تكون عبارة عن أقطاب بارزة (سرعة المنخفضة) أو أقطاب غاطسة (سرعة عالية) وتغذى تلك الأقطاب بالتيار المستمر وذلك لتوليد مجال مغناطيسي ثابت القيمة وتكون تلك التغذية من خلال فرش وحلقات انزلاقية أو باستعمال الدوائر الموحدة للتيار (دوائر تغيير التيار المتردد إلى تيار مستمر) وأحيانا تكون تغذية ملفات المجال المغناطيسي تغذية ذاتية.

ويستخدم هذا النوع من المولدات (ثنائي الأقطاب أو رباعي الأقطاب) عندما يكون المحرك الأولي عبارة عن توربينة بخارية عالية السرعة ويتم توصيل التوربينة للمولد عن طريق عمود دوران على شكل أسطوانة لها طول محوري كبير وقطر صغير نسبيا وذلك للحد من مقدار القوى الطاردة المركزية.

وعندما يكون المحرك الأولي عبارة عن توربينة هيدروليكية تكون السرعة أبطأ ويلزم استخدام عدد أقطاب أكثر. ولذلك فإن العضو الدوار يصمم بحيث يكون من النوع ذي الأقطاب البارزة ويكون بطيئا وقطره كبيرا جدا، وطول محوره صغيراً نسبيا وعادة يكون عمود الدوران الخاص بالتوربينة والمولد في وضع رأسي مع وضع التوربينة أسفل المولد.

ويحتوي العضو الدوار على أقطاب عددها زوجي وتوجد داخل هذه الأقطاب فجوات توضع فيها موصلات ملفات المجال المغناطيسي. وتغذى تلك الملفات من مصدر يمكن التحكم في جهده. وتحمل الملفات الموجودة تحت قطب واحد ذي تيار مستمر ذي اتجاه واحد ويتغير اتجاه التيار المستمر من قطب إلى آخر. ولذلك تكون القوة الدافعة المغناطيسية الخاصة بالعضو الدوار مترددة القيمة حول محيط المولد. ويرمز للمجال المغناطيسي الخاص بملفات العضو الدوار بالمحور المباشر أو المحور (d) ويرمز للمحور العمودي عليه بمحور التعامد أو المحور (q).

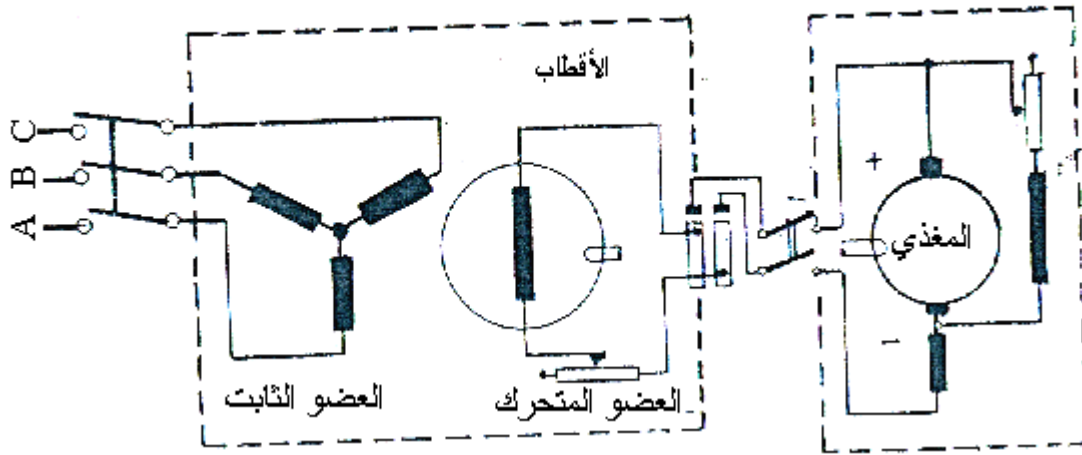
٢ - ٢ - ٢ العضو الثابت:

يتكون من هيكل خارجي وغطاءين جانبيين ومثبت بالمحيط الداخلي للهيكل رقائق حديدية لها فتحات (مجار) موجودة على أبعاد متساوية وموزعة على السطح الداخلي الكلي للعضو الثابت. وتقسم ملفات عضو الإنتاج إلى ثلاثة ملفات متماثلة خاصة بالأطوار الثلاثة. وتكون تلك الملفات ثلاث دوائر كهربائية بين كل منها ١٢٠ درجة كهربائية وتوصل عادة على شكل نجمة والتي توصل عادة بالأرضي.

٢- ٢- ٣ ملفات الإخماد:

بالإضافة إلى ملفات المجال وملفات عضو الإنتاج فإن جميع المولدات التزامنية يتم تزويدها بملفات إخماد في العضو الدوار وهذه الملفات مكونة من أقفاص سلكية موصلة كدائرة قصر ومشابهة لملفات القفص السنجابي الخاصة بالمحركات الحثية. وتدخل تلك الملفات عملية التشغيل عند حالات القصر الكهربائي.

وبالنسبة إلى الفيض المغناطيسي في العضو الدوار، فإنه يكون ثابتاً في حالات التشغيل العادية ولكنه متغير مع الزمن في العضو الثابت. ولذلك يصنع العضو الثابت على هيئة شرائح لتقليل كمية الفقد للمجال المغناطيسي داخل الحديد.



شكل (٢-٢) تغذية الأقطاب بواسطة مولد تيار مستمر

٢- ٣ مصادر تغذية الأقطاب:

تتم تغذية الأقطاب المنتجة للفيض المغناطيسي بواسطة دوائر عدة نذكر منها ما يلي:

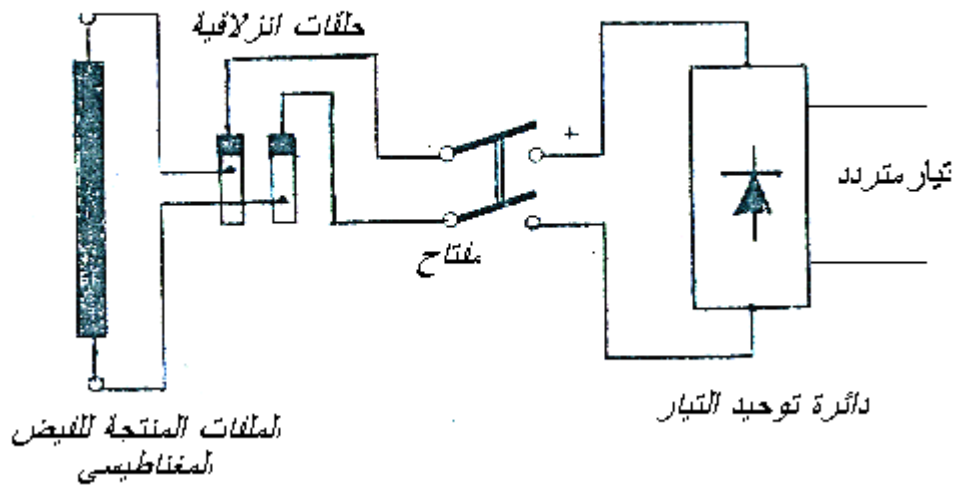
٢- ٣- ١ التغذية بواسطة المغذي

تعتبر هذه الطريقة من أكثر الطرق شيوعاً (سابقاً) ويتم ذلك بتوصيل أطراف ملفات الأقطاب للمولد التزامني مع أطراف المغذي والذي يكون مولد تيار مستمر من نوع التوازي مثبتاً مع محور دوران المولد التزامني ويوضح الشكل (٢-٢) طريقة تغذية أقطاب المولد التزامني باستخدام مولد تيار مستمر.

٢-٣-٢ التغذية بواسطة مجموعة من المولدات

في هذه الطريقة تغذى ملفات أقطاب المولد التزامني باستخدام مجموعة من مولدات التيار والتي تقوم بتوحيد التيار المتردد المتولد من مولد تيار متردد إلى تيار مستمر ويقوم هذا التيار المستمر بتغذية أقطاب المولد المتزامن. ويوضح شكل (٢-٣) طريقة تغذية ملفات المجال المغناطيسي لمولد تزامني باستخدام مجموعة من المولدات.

ويوجد طرق أخرى لتغذية الأقطاب بالتيار المستمر.



شكل (٢-٣) تغذية ملفات أقطاب المولد التزامني بواسطة مجموعة من المولدات

٢-٤ توليد موجات القوة الدافعة الكهربائية الخاصة بالعضو الثابت :

عند مرور تيار مستمر (I_f) في ملفات المجال (ملفات العضو الدوار) فإنه تتولد قوة دافعة مغناطيسية وبالتالي يتكون فيض المجال الرئيس في العضو الدوار. وتعمل الأقطاب البارزة والتي تأخذ الشكل المدبب إلى وصول كثافة الفيض عبر المحور (d) إلى قيمة عظمى، ثم وصول كثافة الفيض عبر المحور (q) إلى قيمة صغرى (صفر) وبضبط التدرج في أوجه الأقطاب يمكن الحصول على توزيع جيبي للفيض المغناطيسي خلال الفجوة الهوائية.

وعند دوران العضو الدوار بسرعة تزامنية ثابتة فإن ملفات المنتج الموجودة على العضو الثابت سوف تتعرض إلى موجة فيض متنقلة (متغيرة). وعندما يقطع الفيض المغناطيسي الذي كثافته (β) الموصلات العمودية لملفات العضو الثابت بسرعة نسبية S فينشأ في الموصل العمودي قوة دافعة كهربائية لها قيمة لحظية:

$$e = \beta S \quad V/m \quad (٢ - ١)$$

حيث تقاس (β) بالتسلا وتقاس السرعة بوحدة متر لكل ثانية.

ونتيجة لأن توزيع الفيض جيبي الشكل، فإن توزيع القوة الدافعة الكهربائية المتولدة على ملفات المنتج سوف تكون هي الأخرى جيبيه الشكل وتكون سرعة تلك الموجة هي نفس سرعة موجة الفيض المغناطيسي.

وتتكون موجة الفيض وموجة القوة الدافعة الكهربائية من دورات كاملة عددها $(P/2)$ حول المحيط الكلي للعضو الثابت.

وبافتراض أن سرعة دوران العضو الدوار هي (n) مقدرة باللفة في الدقيقة فإن القوة الدافعة الكهربائية الناشئة سوف يكون ترددها:

$$f = \left(\frac{p}{2} \right) \left(\frac{n}{60} \right) \quad \text{Hz} \quad (٢ - ٢)$$

وعلى سبيل المثال فإن المولد ذا القطبين عندما يدور بسرعة ٣٦٠٠ لفة في الدقيقة سوف يكون تردد القوة الدافعة الكهربائية الناشئة على ملفات العضو الثابت هي ٦٠ ذبذبة في الثانية (Hz).

ونظرا لأوضاع الملفات المولدة للقوة الدافعة الكهربائية على العضو الثابت فإن القوة الدافعة الكهربائية الناشئة على الوجه B سوف تتأخر عن القوة الدافعة الناشئة على الوجه A بمقدار ١٢٠ درجة كهربائية بينما سوف تتأخر القوة الدافعة الكهربائية الناشئة على الوجه C عن القوة الدافعة الناشئة على الوجه A بمقدار ٢٤٠ درجة كهربائية (الف ABC). لذلك سوف تكون القوة الدافعة الكهربائية المتولدة عبارة عن مجموعة ثلاثية الوجه (الطور) ومتماثلة.

وسوف نرسم للفيض المغناطيسي الناشئ عن التيار المار في ملفات المجال بالرمز Φ_f وبالرمز Φ_a للفيض المغناطيسي الناشئ عن التيار المار في ملفات عضو الإنتاج. باعتبار الوجه A هو الوجه المرجع فإن الفيض Φ_{fa} المتولد من ملفات المجال بالنظر إليه من جهة العضو الدوار فسوف تظهر كأنها فيض ثابت. أما إذا نظرنا لها من جهة العضو الثابت فسوف تظهر كأنها فيض متردد وتردده هو نفس التردد f .

$$\Phi_{fa} = \Phi_{fa} \cos \omega t = -\Phi_{fa} \sin(\omega t - 90) \quad (٢-٣)$$

Φ_{fa} مقاسه بالويبر لكل طور، والزوايا ωt هي السرعة الزاوية للمجال الدوار.

$$\omega = 2\pi f \quad (٢-٤)$$

بتطبيق قانون فارادي نحصل على القوة الدافعة الكهربائية المتولدة على الوجه A كما يلي:

$$e = -N \frac{d\Phi_{fa}}{dt} \quad V \quad (٢-٥)$$

$$e = N \omega \Phi_{fa} \cos(\omega t - 90) \quad V \quad (٢-٦)$$

حيث N عدد اللفات

وتكون قيمة rms للقوة الدافعة الكهربائية للوجه هي:

$$E = N \frac{\omega \Phi_{fa}}{\sqrt{2}} \quad V \quad (٢-٧)$$

أما إذا رجعنا إلى Φ_{aa} الناشئ من ملفات الإنتاج والتي تعرف باسم موجه الفيض لرد فعل عضو الإنتاج والناشئ من تيار عضو الإنتاج فإن الوجه المرجعي A سيواجه الفيض Φ_{aa} كما لو كان فيضاً متردداً. وكما سبق فإن القوة الدافعة الكهربائية المتولدة من هذا المجال ستكون:

$$e_t = N \omega \Phi_{aa} \sin(\omega t - 90 - \beta) \quad V \quad (٢-٨)$$

حيث الزاوية β الزاوية التي يسبق بها المجال Φ_{aa} التيار المسبب له.

وتكون قيمة rms للقوة الدافعة الكهربائية للوجه هي:

$$E_t = N \frac{\omega \Phi_{aa}}{\sqrt{2}} \quad (٢-٩)$$

لذا تكون القوة الدافعة الكهربائية الكلية (E_{res}) الخاصة بعضو الإنتاج بالجمع الاتجاهي للمعادلة (٢-٦) والمعادلة (٢-٨) هي:

$$E_{res} = E + E_t \quad (٢-١٠)$$

$$E_{res} = E - JX_s I \quad (٢-١١)$$

حيث (X_s) هي المفاعلة التزامنية.

وتوضح المعادلة (٢-٧) والمعادلة (٢-١١) أن التحكم في القوة الدافعة الكهربائية الناشئة على ملفات العضو الثابت يمكن أن يتم من خلال:

١. التحكم في عدد اللفات في كل وجه
٢. التحكم في عدد الأقطاب.
٣. التحكم في سرعة الدوران.
٤. التحكم في تيار المغذي لملفات المجال.
٥. معامل اللف.

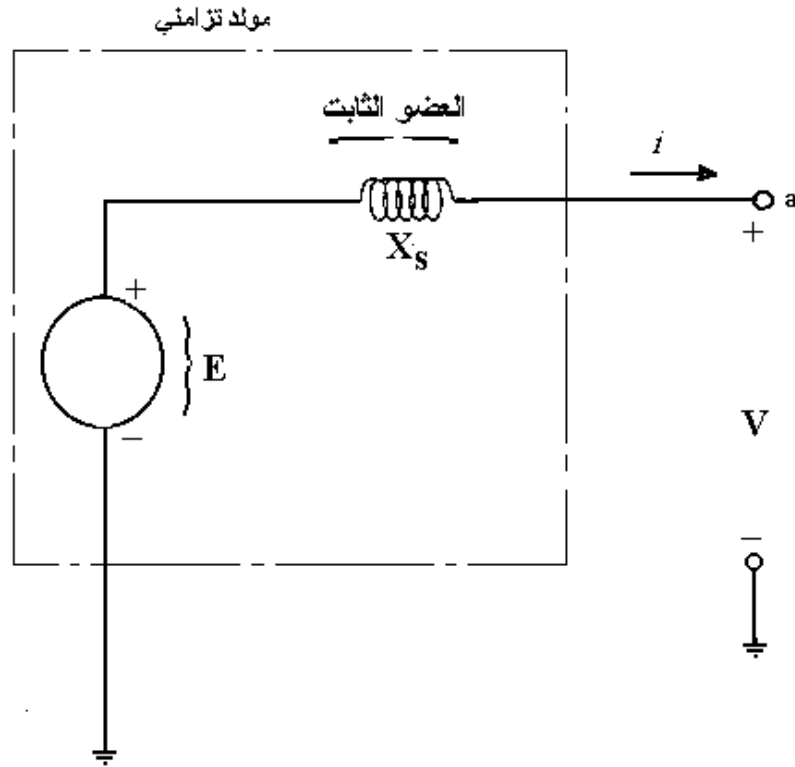
بينما توضح المعادلة (٢-٢) أن التحكم في التردد الخاص بالقوة الدافعة الكهربائية الناشئة على ملفات العضو الثابت يمكن أن يتم عن طريق:

١. التحكم في عدد الأقطاب.
٢. التحكم في سرعة الدوران.

٢-٥ الدائرة المكافئة للمولدات التزامنية

يوضح الشكل (٢-٤) إحدى الطرق لرسم الدائرة المكافئة للمولدات التزامنية تمثل بمعاوقة تتكون من مفاعلة تزامنية (X_s) متصلة على التسلسل مع مقاومة (R_s) حيث:

$$X_s = \omega L_s$$



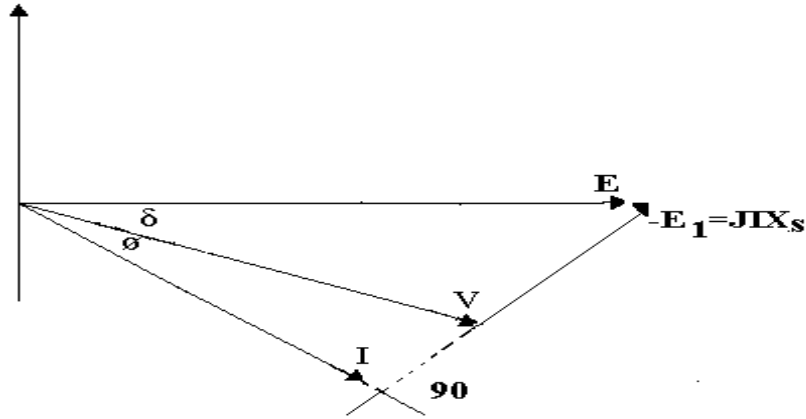
شكل (٢- ٤) الدائرة المكافئة للمولد التزامني

ويكون الجهد المفقود على مقاومة عضو الإنتاج R_s أقل من 0.01 من الجهد المتولد على المولد. لذا يمكن إهمال تلك المقاومة ولذلك لم تظهر في الدائرة المكافئة.

ويكون الجهد الخارج من المولد لكل وجه مساويا للجهد المعطى في المعادلة (٢- ١١)

$$V = E_{res} = E - JX_s I \quad (٢- ١٢)$$

وهذا الجهد توضحه الدائرة المكافئة و كذلك الرسم الاتجاهي شكل (٢- ٥).



شكل (٢- ٥) الرسم الاتجاهي للدائرة المكافئة

ملحوظة:

R_s تزيد بينما تقل X_s في المولدات الصغيرة.

δ : هي الزاوية بين الجهد الخارجي والجهد الداخلي المتولد (زاوية توليد القدرة الفعالة).

ϕ : هي الزاوية بين الجهد الخارجي والتيار الناشئ من الحمل (زاوية معامل القدرة).

(E_{af}) : هو الجهد الناشئ على ملفات كل وجه الموجودة على عضو الإنتاج ويكون مخطط المتجهات للمولد التزامني موضعاً بالمعادلة:

$$E_{af} = V + I(R_s + jX_s) \quad (٢- ١٣)$$

٢- ٦ ربط محطة التوليد مع الشبكة الكهربائية:

مع ازدياد الطلب على استخدام الطاقة الكهربائية في الأغراض الصناعية والتجارية بدأ يزداد حجم محطات التوليد وقدرتها. ومع ابتعاد أماكن التوليد عن أماكن الاستخدام بدأ توليد الكهرباء على نطاق كبير ونقل تلك الطاقة المولدة إلى أماكن التوزيع ومع زيادة الأحمال بدرجة كبيرة على بعض

المحطات بما يزيد على طاقتها القصوى في بعض الأوقات وفي نفس الوقت تكون الأحمال خفيفة وأقل من سعتها على المحطات الأخرى. لذا نشأت فكرة الربط بين محطات التوليد لكي يمكن توزيع الأحمال الزائدة على المحطات جميعاً بحيث لا يتعدى الحمل في أي وقت عن الطاقة القصوى لكل محطة وبذلك أصبحت لدينا شبكة واحدة مترابطة تتمثل في قضبان عمومية تتصل بها وتغذيها جميع وحدات التوليد في جميع المحطات.

من هنا أصبح مقنن قدرة هذه القضبان كبيرة جداً ومساوياً لمجموع مقنن قدرات الوحدات في جميع المحطات، بحيث تكون القدرة من أية محطة صغيرة جداً بالنسبة إلى قيمة القدرة الهائلة المتجمعة على تلك القضبان وتسمى تلك القضبان العمومية بالقضبان اللانهائية.

ويجب هنا الإشارة إلى أنه نظراً لصغر قدرة المحطة الواحدة بالنسبة لقيمة القدرة المتجمعة على القضبان اللانهائية فإن توصيل أو فصل المحطة عن القضبان لا يمكن أن يؤثر في قيمة الجهد أو التردد على تلك القضبان اللانهائية وذلك إلى جانب وجود معدات وأجهزة تعمل على حفظ الجهد والتردد ثابتين لتلك القضبان ولذلك يمكننا أن نسمي تلك القضبان بالقضبان ذات التردد والجهد الثابتين.

٢-٦-١ الشروط اللازمة لربط محطة التوليد مع الشبكة الكهربائية

يجب التأكد من توافر الشروط الآتية قبل توصيل المولد التزامني إلى القضبان اللانهائية:

١. أن يكون الجهد المرحلي على أطراف المولد مساوياً للجهد الواقع على القضبان اللانهائية V ونظراً لأن ملفات المولد لا يمر فيها تيار في تلك اللحظة فإن القوة الدافعة الداخلية للمولد (E) تكون مساوية للجهد الواقع على القضبان. وهذا يعني أن القوة الدافعة الكهربائية المرحلية المتولدة على أطراف العضو الثابت بفعل الأمبير لفات لكل قطب من الأقطاب الموجودة على العضو المتحرك (NI) يجب أن تساوي في القيمة وتتفق مرحلياً مع جهد القضبان.

٢. أن تكون قيمة تردد المولد عندما يدور المولد بالسرعة التزامنية n_s لفة في الدقيقة مساوياً لتردد القضبان اللانهائية الثابت (f) أي إنه لا بد أن يكون:

$$f = \frac{pn_s}{120} \text{ Hz} \quad (٢-١٤)$$

وهذا يعني أن تثبت الآلة (المولد) على الدوران بالسرعة التزامنية n_s .

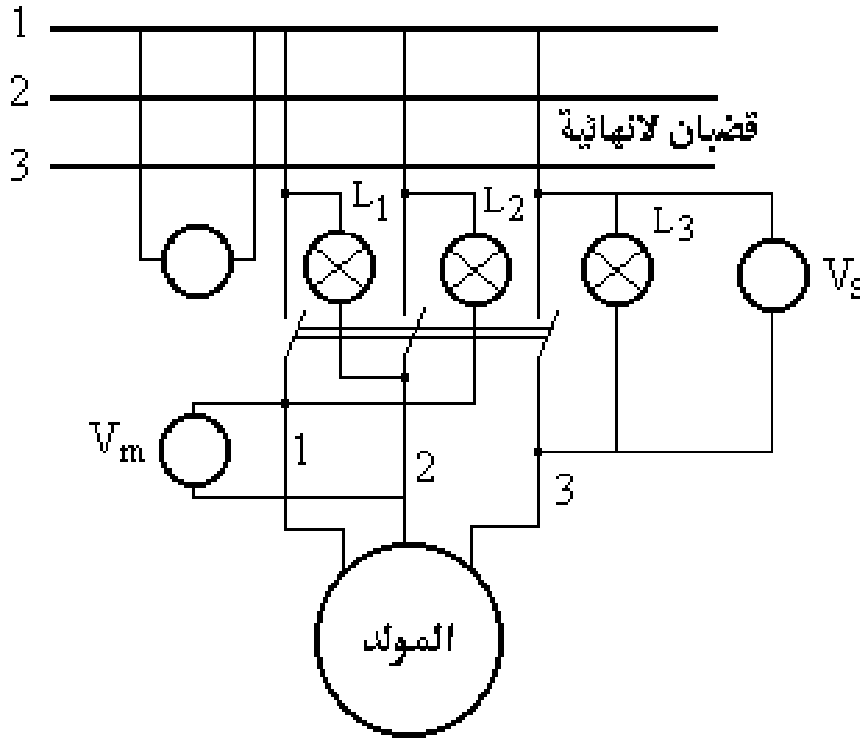
أن يتم توصيل أطراف التوصيل للمولد بالتتابع المضبوط بمعنى أن يتم توصيل طرف الوجه A للمولد على القضيب الموصل على الوجه A للمولدات الأخرى وهكذا للوجه B ، C أي إنه يجب أن يكون التعاقب المرحلي للمولد يماثل التعاقب المرحلي للقضبان اللانهائية وعند توافر الشروط الثلاثة السابقة يتم قفل مفتاح التزامن كما هو موضح بالشكل (٢ - ٦).

وتبدأ عملية التزامن بإعداد التوربينه نفسها وإدارتها لكي تدير المولد وضبط الضغط والسرعة لضبط التردد والقوة الدافعة الكهربائية للمولد ثم المراجعة على صحة التعاقب للأوجه وذلك قبل فتح مفتاح التزامن الذي يصل الآلة بالقضبان اللانهائية كما هو مبين بالشكل (٢ - ٦).

٢ - ٦ - ٢ ربط محطة التوليد مع الشبكة الكهربائية بطريقة المصباح المضئ :

يوضح الشكل (٢ - ٦) كيفية إجراء عملية التزامن بطريقة المصباح المضئ حيث توصل ثلاثة مصابيح كهربائية (L_1, L_2, L_3) عبر مفتاح التزامن بين الآلة والقضبان اللانهائية. بحيث يتم توصيل المصباح الأول L_1 بين طرف الآلة رقم ٢ وبين القضيب رقم ١ ، ويوصل المصباح الثاني L_2 بين طرف الآلة رقم ١ وبين القضيب رقم ٢ ، ثم يوصل المصباح الثالث L_3 بين طرف الآلة رقم ٣ وبين القضيب رقم ٣. أي إن المصباحين الأول والثاني موصلان توصيلاً متقاطعاً بين الآلة والقضبان. بينما المصباح الثالث موصل توصيلاً مباشراً بين الآلة والقضيب [3].

يوصل الفولتميتر V_b لبيان جهد الخط بين القضبان ، بينما يتم توصيل الفولتميتر V_m لبيان جهد الخط المرحلي للمولد. كما يوصل الفولتميتر V_s لبيان الفرق في الجهد بين الفولتميتر V_b والفولتميتر V_m . وعندما تكون قراءة V_s تساوي صفراً يتم التأكد من أن جهد المولد مسمى لجهد القضبان.



شكل (٢ - ٦) ربط المولد بالقضبان اللانهائية بطريقة المصابيح المضئية

وتبدأ عملية التزامن بضبط قراءات الفولتميترات الثلاثة عن طريق تغيير تيار التغذية للمفات المجال المغناطيسي مع ضبط سرعة الدوران للمولد عند السرعة التزامنية. وفي أثناء زيادة تيار التغذية تحدث إحدى الأحداث التالية:

- أن تضاء جميع المصابيح بطريقة غير منتظمة:

في هذه الحالة يكون التعاقب المرحلي للمولد (ترتيب الأوجه) مختلفا عن التعاقب المرحلي للقضبان. ويلزم لذلك تبديل توصيل أي طرفين من أطراف المولد الثلاثة على مفتاح التزامن لكي يصبح التعاقب المرحلي للمولد مماثلا للتعاقب المرحلي للقضبان.

- أن تضاء وتطفأ المصابيح الثلاثة بالتتابع وبطريقة دورية منتظمة:

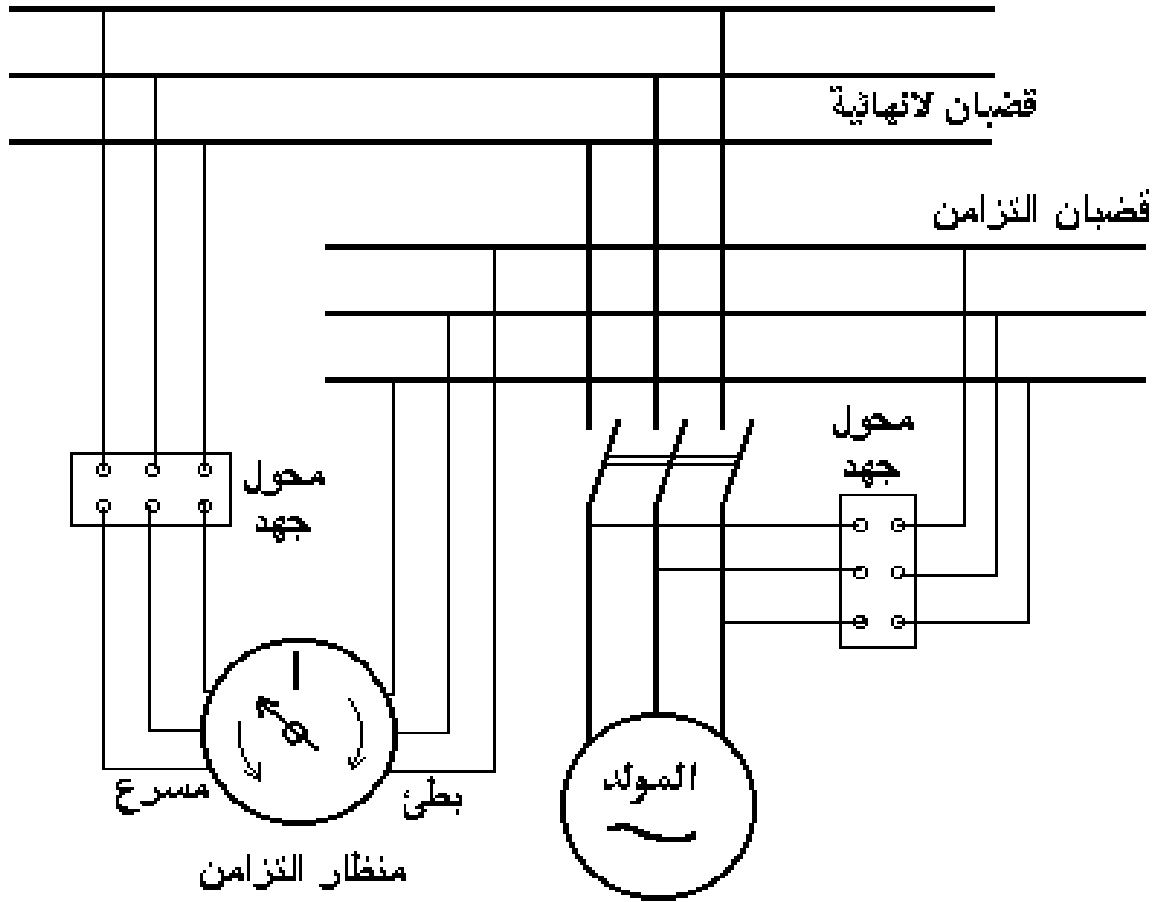
ويعني ذلك أن التعاقب المرحلي لأطراف التوصيل للمولد متماثلة مع التعاقب المرحلي لأطراف التوصيل للقضبان بينما التردد للمولد لم يصل إلى القيمة المضبوطة ويلزم تقليل السرعة أو زيادتها لكي تصل قيمة تردد الآلة إلى القيمة التي تساوي تردد القضبان. ويتبين لنا من دورة تعاقب إضاءة المصابيح وإطفائها ما إذا كانت الآلة أسرع أم أبطأ من السرعة المطلوبة. فيكون تعاقب الإضاءة في حالة الآلة أسرع بترتيب مضاد لتعاقب الإضاءة في حالة ما إذا كانت السرعة أبطأ.

وعندما يستقر الوضع على أن يصبح المصباحان الأول والثاني مضئين بنفس الدرجة والمصباح الثالث مظلماً تأكد من أن تردد الآلة أصبح مساوياً لتردد القضبان، مع تماثل التعاقب للمولد والقضبان واستمرار الحفاظ على تساوي الجهد للمولد والقضبان وذلك عن طريق ضبط تيار التغذية للملفات المنتجة للمجال المغناطيسي.

وبذلك تكون عملية التزامن قد تمت ويمكن عند ذلك قفل مفتاح التزامن لكي يصبح المولد موصلًا على القضبان اللانهائية دون أن يمر به أي تيار (لا يصبح محركاً) ويقال عند ذلك أن المولد أصبح عائماً على القضبان.

٢- ٦- ٣ ربط محطة التوليد مع الشبكة الكهربائية بواسطة منظار التزامن

يستخدم منظار التزامن للمساعدة في إتمام عملية التزامن والتأكد من توافر الشروط السابقة لعملية التزامن ويتم أولاً إجراء عملية التزامن على قضبان تزامن خاصة أولاً حتى لا يحدث أية مشاكل في الشبكة الكهربائية نتيجة حدوث أية أعطال أو أخطاء في عملية التزامن ويمكن تزويد الدائرة بأجهزة تحكم تمنع توصيل مفتاح التزامن عند حدوث أخطاء أو أعطال أو إذا لم تتوفر شروط التزامن السابقة. ويتكون منظار التزامن من ثلاث ريش من الحديد موجودة على محور واحد يفصل بين كل ريشتين منها زاوية مقدارها ١٢٠ درجة وتكون الريش معرضة للمجال المغناطيسي الذي ينشأ نتيجة وجود المجال المغناطيسي الدائر بفعل جهد القضبان مع المجال المغناطيسي الدائر بفعل جهد المولد التزامني. لذلك يدور مؤشر المنظار في اتجاه المجال الأسرع بحيث يمكن معرفة هل الآلة سريعة أو بطيئة عن الحد المطلوب. ويتحدد ذلك بفعل دوران المؤشر بالنسبة لعلامة واضحة ويكون وقوف المؤشر دليلاً على استقرار العملية على الوضع الصحيح لعملية التزامن. ويوضح الشكل (٢- ٧) كيفية استخدام منظار التزامن للمساعدة في عملية ربط المولد على القضبان اللانهائية.



شكل (٢ - ٧) استخدام منظار التزامن لربط المولد على قضبان لانهائية

٢ - ٧ دراسة سلوك المولدات التزامنية المتصلة بالقضبان اللانهائية :

يختلف سلوك المولدات التزامنية وخواص تشغيلها عندما يتم ربطها على قضبان لانهائية لكي تقوم بالمساعدة في تغذية الأحمال اختلافاً تاماً عن سلوكه وخواص تشغيلها عند ربطها على حمل منفصل. حيث تصبح تلك المولدات عندما يتم ربطها على قضبان لانهائية موصلة على التوازي مع جميع المحطات الأخرى الموصلة على هذه القضبان. وتصبح الآلة عائمة على القضبان ويمكن تشغيلها كمولد أو محرك وسوف نتعرض لكيفية تغيير قيمة تيار الحمل الذي يسري من الآلة إلى القضبان عندما تعمل كمولد أو يسري من القضبان إلى الآلة عندما تعمل كمحرك .

ويبنى تغيير اتجاه التيار في الآلات التزامنية على ما يلي:

- العلاقة بين القوة الدافعة الكهربائية المتولدة والجهد على أطراف المولد والتيار الحمل معاوقة التزامن والتي تعتبر ثابتة ويمكن كتابة تلك العلاقة على الصورة التالية:

$$V = E - JZ_s I \quad (٢- ١٥)$$

- العلاقة بين القوة الدافعة الكهربائية المتولدة وبين كل من الفيض المغناطيسي الناشئ من الأمبير لفات على كل قطب وسرعة التزامن والتي توضح أن القوة الدافعة الكهربائية المتولدة تتناسب تناسباً طردياً مع كل من الفيض المغناطيسي المحصل داخل الفراغة الهوائية للمولد وكذلك مع سرعة التزامن والتي يمكن كتابتها على الصورة التالية:

$$E = K \Phi n_s \quad (٢- ١٦)$$

وتوضح المعادلتان (٢- ١٥)، (٢- ١٦) أن تعديل التيار I في القيمة والاتجاه لا يمكن أن يتم في الآلة التزامنية العائمة على قضبان لانهائية إلا بتعديل قيمة واتجاه القوة الدافعة الكهربائية المتولدة E وبالتالي تعديل كل من السرعة التزامنية والفيض المغناطيسي لأن كلا من الجهد V و المعاوقة Z_s ثابتا القيمة والاتجاه.

أولاً بالنسبة لتعديل سرعة التزامن n_s :

نجد بصورة عامة أنه لا يمكن تعديل n_s لأن ذلك يناقض أهم خصائص الآلة التزامنية وهي ثبوت السرعة التزامنية، بما يتناسب مع ثبوت تردد القضبان الموصلة إليها (معادلة لتعديل ٢ - ١٦) ولكن يمكن تغيير السرعة في فترات عابرة (لحظات قصيرة جداً)، ثم تعود السرعة إلى قيمتها الأصلية في حالتها المستمرة.

- في حالة تغيير السرعة والآلة تعمل كمولد للتأثير على قيمة واتجاه القوة الدافعة الكهربائية المتولدة وذلك بتغيير زاوية القدرة δ (زاوية الجهد الخارجي للمولد عند تحميله) فإن الوسيلة الآمنة لذلك تكون عن طريق تغيير عزم الدوران المحرك للمولد وذلك بتغيير ضبط المنظم من أجل تغيير استهلاك الوقود أو دخول البخار أو الماء للتوربينة وفي هذه الحالة تتغير سرعة الآلة لحظياً بسبب اختلال التوازن بين عزم دوران المحرك على عمود الإدارة وعزم الدوران المضاد الناشئ عن رد فعل المنتج، والمتمثل في المجال المغناطيسي الدوار ويؤدي ذلك في النهاية إلى تغيير في قيمة الزاوية δ .

ومما سبق نستطيع القول بأنه يمكن الاستعاضة عن تغيير السرعة للتأثير على قيمة واتجاه القوة الدافعة الكهربائية بتغيير ضبط المنظم في الآلة التي تدير المولد بحيث ينتج عن تغيير في القدرة الفعالة التي تعطى للقضبان من المولد. وفي هذه الحالة ينشأ تغيير في قيمة الزاوية δ .

- في حالة تغيير السرعة والآلة تعمل كمحرك للتأثير على قيمة القوة الدافعة الكهربائية وذلك بتغيير زاوية القدرة δ (زاوية الجهد الخارجي للمولد عند تحميله) فإن الوسيلة الآمنة لذلك تكون عن طريق تغيير الحمل الميكانيكي على عمود الإدارة لإيجاد الاختلال اللازم وعدم التوازن بين عزم دوران المحرك على عمود الإدارة وعزم الدوران المضاد الناشئ من الحمل بحيث ينشأ تغير لحظي للسرعة مما يؤدي إلى حدوث التغير المطلوب في قيمة الزاوية δ .

ثانياً بالنسبة لتعديل الفيض المغناطيسي Φ :

يمكن أن يتم ذلك بتعديل قيمة القوة الدافعة المغناطيسية وذلك عن طريق تغيير قيمة التيار المغذي للملفات المجال المغناطيسي وهذا التعديل لا يغير في القدرة الفعالة التي يعطيها المولد للقضبان في حالة تشغيل الآلة كمولد أو يأخذها المحرك من القضبان في حالة تشغيل الآلة كمحرك. ولكن هذا التعديل له تأثير مباشر على مركبة التيار غير الفعالة (رد فعل المنتج) والتي تؤدي إلى تغيير في قيمة القدرة غير الفعالة التي تعطيها الآلة للقضبان عندما تعمل الآلة كمولد أو القدرة غير الفعالة التي تأخذها الآلة من القضبان عندما تعمل كمحرك. هذا التغيير في القدرة غير الفعالة يؤثر في معامل القدرة التي تعمل على الآلة وبالتالي في الزاوية بين الجهد والتيار.

٢- ٨ الاختلاف في سلوك المولدات التزامنية المتصلة بالقضبان اللانهائية والمولدات غير المتصلة

- يمكن تلخيص سلوك المولدات المتصلة بالقضبان اللانهائية سواء التي تعمل كمولد أو محرك كما يلي:
- تغيير ضبط المنظم الذي يتحكم في الوقود أو الماء وتغيير الحمل الميكانيكي على عمود إدارة المحرك لا يحدث أي تغيير في القدرة غير الفعالة وإنما يؤدي إلى تغيير في القدرة الفعالة التي يعطيها المولد أو التي يأخذها المحرك من القضبان وهذا التغيير يؤدي إلى تغيير في مركبة التيار الفعالة.
- إن تغيير تيار ملفات المجال لا دخل له بالقدرة الفعالة التي يعطيها المولد للقضبان أو بالحمل الميكانيكي على عمود إدارة المحرك وإنما يعمل على تغيير في القدرة غير الفعالة التي يعطيها المولد إلى القضبان أو التي يأخذها المحرك من القضبان وهذا يؤثر على مركبة التيار غير الفعالة لأن الجهد ثابت القيمة.

- التغيير في الحالتين السابقتين يحدث تغييراً في معامل القدرة أي في زاوية الاختلاف بين الجهد والتيار ولكن التغيير في الحالة الثانية أبعد أثراً على تغيير معامل القدرة والزاوية من التغيير في الحالة الأولى.

يمكن تلخيص الاختلاف في سلوك الآلات التزامنية المتصلة بالقضبان عن التي تعمل منفصلة في النواحي التالية:

- من المعروف أنه يمكن تغيير الجهد الواقع على أطراف الآلة وكذلك تغيير تيار الحمل بتغيير تيار المنتج مما يؤدي إلى تغيير القوة الدافعة الكهربائية المتولدة من المولد التزامني إذا كان المولد متصلاً لتغذية حمل منفصل بينما لا يمكن تغيير الجهد على أطراف الآلة المتصلة بالقضبان لانهائية لأن جهد تلك القضبان لا يتأثر بأية تغييرات تحدث في الآلة كما أن هناك معدات وأجهزة تعمل على حفظ الجهد الثابت • ولكن هذا التغيير في تيار المنتج يؤدي إلى تغييرات في خواص الآلة كما سنوضحه لاحقاً •
- يتعين معامل القدرة في المولد الذي يعمل على حمل منفصل بناءً على نوع هذا الحمل من حيث الممانعة السعوية والممانعة الحثية والمقاومة بينما يمكن ضبط معامل القدرة على قيمة معينة في حالة توصيل المولد على قضبان لانهائية وذلك بتغيير تيار المنتج كما سنوضحه لاحقاً •
- يمكن بدء تشغيل الآلة التي تغذي حملاً منفصلاً دون اتخاذ احتياطات معينة بينما يلزم عمل عملية التزامن التي يجب أن تنفذ بكل دقة قبل ربط المولد التزامني على قضبان لانهائية •

٢- ٩ إنتاج القدرة في محطات التوليد:

تتبع الأهمية الأولى للمولدات من الاستخدام لإنتاج القدرة الكهربائية. وللوصول إلى صيغة للقدرة الكهربائية بدلالة عوامل يمكن قياسها بسهولة (عوامل ليست داخل المولد) نبدأ من الصيغة المشهورة للقدرة المركبة الكلية لكل وجه:

$$S_G = P_G + Q_G \quad (٢- ١٧)$$

$$S_G = |V||I| \cos \phi + j|V||I| \sin \phi \quad (٢- ١٨)$$

حيث تمثل الكميات $|V|$ ، $|I|$ ، ϕ عوامل معروفة يمكن قياسها وتظهر في الشكل (٢- ٨) ويجب ملاحظة أن التيار يكون موجبا عندما يكون خارجا من المولد ولذلك فإن المعادلة (٢- ١٨) توضح أن القدرة الفعالة (P_G) والقدرة غير الفعالة (Q_G) موجبتان في حالة المولد.

ومن الرسم التخطيطي للمتجهات الموضح في شكل (٢- ٨) يمكن استنتاج المعادلات التالية:

$$(٢- ١٩) \quad |E| - I_d X_d = |V| \cos \delta$$

$$(٢- ٢٠) \quad I_q X_q = |V| \sin \delta$$

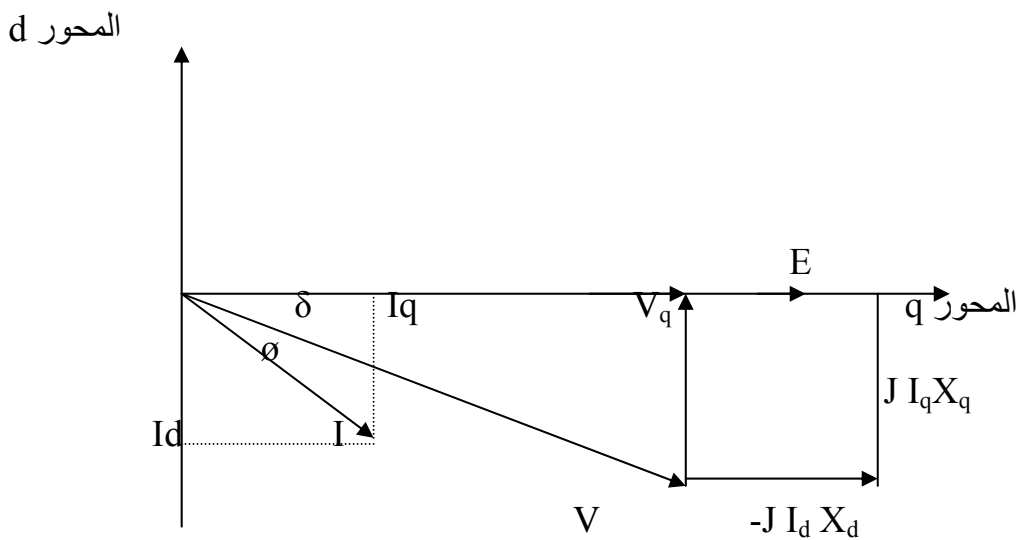
وكذلك نحصل على:

$$(٢- ٢١) \quad I_q = |I| \cos \beta$$

$$(٢- ٢٢) \quad I_d = |I| \sin \beta$$

حيث تكون علاقة الزوايا كما يلي:

$$\phi = \beta - \delta$$



شكل (٢- ٨) الرسم التخطيطي لمتجهات الجهد والتيار للمولد التزامني

وبالتعويض عن تلك القيم في المعادلة (٢ - ١٧)، (٢ - ١٨) نستنتج:

$$P_G = \frac{|V||E|}{X_d} \sin \delta + \frac{|V|^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \quad (٢ - ٢٣)$$

$$Q_G = \frac{|V||E|}{X_d} \cos \delta - |V|^2 \left(\frac{\cos^2 \delta}{X_d} - \frac{\sin^2 \delta}{X_q} \right) \quad (٢ - ٢٤)$$

ولتبسيط المعادلة (٢ - ٢٣)، (٢ - ٢٤) وذلك بإهمال تأثير بروز الأقطاب بحيث يمكننا من افتراض:

$$X_d = X_q = X_s \quad (٢ - ٢٥)$$

تصبح المعادلتان (٢ - ٢٣)، (٢ - ٢٤) كما يلي:

$$P_G = \frac{|V||E|}{X_s} \sin \delta \quad (٢ - ٢٦)$$

$$Q_G = \frac{|V||E|}{X_s} \cos \delta - \frac{|V|^2}{X_s} \quad (٢ - ٢٧)$$

ملحوظة:

- وحدات قياس القدرة الفعالة (P_G) هي الميجاوات (MW) لكل وجه. بينما وحدات قياس القدرة غير الفعالة (Q_G) هي الميجا فولت أمبير تخيلي (MVAR) لكل وجه وهما موجبتان في حالة المولد.
- لكي تكون وحدات القدرة الفعالة والقدرة غير الفعالة بالوحدات السابقة لابد أن تكون قيم الجهد والقوة الدافعة الكهربائية بوحدات الكيلوفولت.
- عند استخدام المعادلة (٢ - ٢٧) تكون قيمة المفاعلة التزامنية هي:

$$X_s = \frac{X_d + X_q}{2}$$

مثال:

أوجد القدرة الفعالة والغير الفعالة لمولد هيدروليكي له قدرة كليته 15 MVA ، وتردد 60 Hz وجهد الخط 13.6 Kv علما بأن $X_d = 0.8 \text{ p.u}$ $X_q = 0.65 \text{ p.u}$.

الحل:

$$X_s = \frac{X_d + X_q}{2} = \frac{0.65 + 0.8}{2}$$
$$X_s = 0.725$$

بفرض أن المولد يعمل بحيث:

$$|E| = |V| = 13.6 \text{ kv} = 1 \text{ p.u}$$

باستخدام المعادلات (٢٦ - ٢)، (٢٧ - ٢):

$$P_G = \frac{1}{0.8} \sin \delta + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0.65} - \frac{1}{0.8} \right) \sin 2\delta$$

$$P_G = 1.25 \sin \delta + 0.144 \sin 2\delta$$

$$Q_G = \frac{1}{0.8} \cos \delta - 1 \left(\frac{\cos^2 \delta}{0.8} - \frac{\sin^2 \delta}{0.65} \right)$$

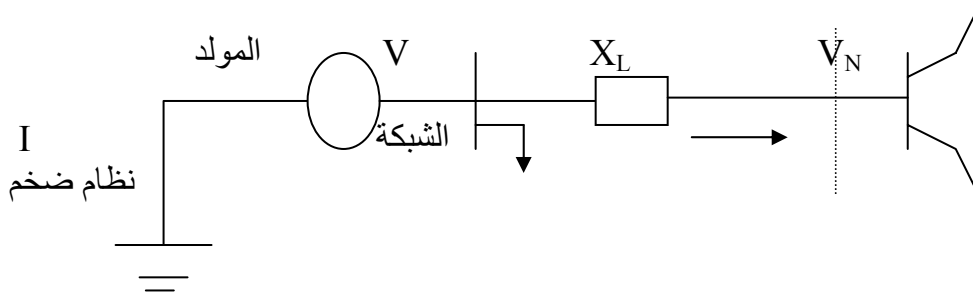
باستخدام الصيغة التقريبية المعطاة في المعادلة:

$$P_G = \frac{1}{0.725} \sin \delta = 1.379 \sin \delta$$

$$Q_G = \frac{1}{0.725} \cos \delta - \frac{1}{0.725} = 1.379 \cos \delta - 1.379$$

ونلاحظ أن الحسابات بالصيغ التقريبية تعطي تقريبا نفس الحسابات بالصيغ غير التقريبية.

٢- ١٠ التحكم في القدرة الفعالة



شكل (٢- ٩) توصيل مولد متزامن مع شبكة ضخمة (قضبان لانهائية)

كما سبق أن أوضحنا أن توصيل المولد على القضبان اللانهائية لن يؤثر في تردد النظام وفي معظم الأحوال لن يؤثر على الجهد العمومي للقضبان V_N وبافتراض أن المولد تم توصيله للشبكة عن طريق خط توصيل ومحولات لها معاوقة حثية X_L وعند ثبوت قيمة القوة الدافعة الكهربائية للمولد تصبح القدرة الحقيقية الناتجة من المولد:

$$P_G \cong \frac{|E||V_N|}{X_S + X_L} \sin \delta_n \cong P_{\max} \sin \delta_n \quad (2-28)$$

$$P_{\max} = \frac{|E||V_N|}{(X_S + X_L)}$$

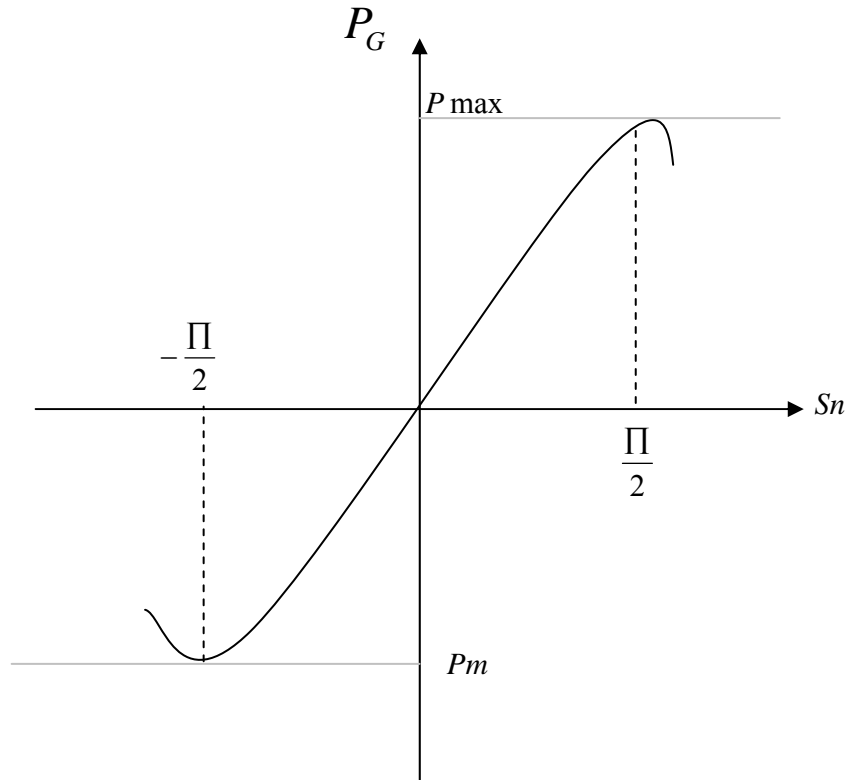
والشكل رقم (٢- ١٠) يوضح تغير القدرة الفعالة للمولد P_G مع زاوية القدرة δ_n . فعندما تكون δ_n موجبة فإن ذلك يعني أن E تسبق V_N ولذلك تكون P_G موجبة وهي الحالة الفعلية للمولد وإذا حدث وكان V_N سابقاً E فإن δ_n تكون سالبة وبذلك P_G تصبح سالبة أي إن المولد يعمل كمحرك ويحدث ذلك عندما يتحرك العضو الدوار إلى وضع متأخر بسبب العزم المتناقص الناتج من عمود الدوران الميكانيكي.

وبلاحظ أنه لتغيير اتجاه القدرة الفعالة لتعمل الآلة كمولد أو تعمل كمحرك يتم عن طريق تغيير

زاوية القدرة.

ويتم تغيير قيمة القدرة الفعالة وذلك بتغيير معامل التزامن الذي يوضح العلاقة بين مقدار الزيادة التفاضلية في القدرة نتيجة الزيادة التفاضلية في زاوية القدرة. ويتم ذلك:

- زيادة E وذلك باستخدام فيض مغناطيسي عالى المقدار
- إنقاص المفاعلة التزامنية (أثناء تصميم الماكينة)
- تشغيل المولد عند زاوية قدرة صغيرة (أقل من 30° درجة)



شكل (٢ - ١) تغير القدرة الفعالة مع زاوية القدرة

مثال:

مولد هيدروليكي تم توصيله على قضبان لا نهائية وكان الجهد للقضبان ثابتاً عند القيمة 1 P.u فإذا كانت معاوقة الوصلة التي بين القضبان والمولد هي 0.11 P.u احسب δ_n إذا كانت E للمولد 1.22 ، P.u ، $X_d = 0.8 \text{ P.u}$ ، $X_q = 0.65 \text{ P.u}$ وكانت P_G للمولد 0.667 P.u .

الحل:

$$X_s = \frac{X_d + X_q}{2} = \frac{0.65 + 0.8}{2}$$

$$X_s = 0.725$$

$$P_{max} = \frac{|E||V_N|}{(X_s + X_L)} = \frac{1.22}{0.725 + 0.11} = 1.461$$

$$P_G \cong P_{max} \sin \delta_n = 1.461 \sin \delta_n$$

$$0.667 = 1.461 \sin \delta_n$$

$$\sin \delta_n = 0.457$$

$$\delta_n = 27.16^\circ$$

٤ - ٣ التحكم في القدرة غير الفعالة للمولد:

لدراسة كيفية التحكم في القدرة غير الفعالة Q_G التي تعطيها الماكينة يجب العودة إلى المعادلة (٢٧ - ٢) مع إضافة المعاوقة الحثية للمحول والخط الذي يربط المولد بالشبكة X_L :

$$Q_G = \frac{|V_N||E|}{X_s + X_L} \cos \delta - \frac{|V_N|^2}{X_s + X_L}$$

هذه الصيغة تفيد أن Q_G تصبح موجبة عندما يتحقق الشرط التالي:

$$Q_G > 0$$

(٢٩ - ٢)

$$|E| \cos \delta_n > |V_N|$$

وهذا يعني أن المولد ينتج قدرة غير فعالة بمعنى أن المولد يعمل من وجهة نظر الشبكة كما لو كان مكثفاً فعمل الآلة كمولد أو محرك في المعادلة السابقة تعتمد على δ_n أي على القدرة الحقيقية

P_G بوجه عام. كما أن العلاقة السابقة تنطبق أيضا في حالة القيم العالية للمقدار E أي في حالة مستوى الإثارة العالية للملفات المنتجة للفيض المغناطيسي. ويطلق على هذه الحالة اسم الإثارة فوق المعدل. ونصل الآن للقاعدة الهامة الآتية:

الماكينة المتزامنة المثارة فوق المعدل (والتي تعمل كمحرك أو مولد) تنتج قدرة غير فعالة وتعمل هذه الماكينة كما لو كانت مكثفا موصلا على التوازي إذا نظر إليها من جهة الشبكة. وعلى العكس من ذلك فإن الماكينة المثارة تحت المعدل تستهلك قدرة غير فعالة من الشبكة ونتيجة لذلك فإنها تعمل كمكثف موصّل على التوازي إذا نظر إليها من جهة الشبكة. ونعرف حالة الإثارة تحت المعدل بالعلاقة الآتية:

$$Q_G < 0$$

$$|E| \cos \delta_n < |V_N|$$

(٣٠ - ٢)

وظاهرة الماكينة المتزامنة المثارة فوق المعدل والتي تنتج بالفعل قدرة غير فعالة للقضبان اللانهاية تعتبر ميزة وفائدة وتسمى بالمكثف المتزامن والماكينة من هذا النوع من التشغيل لا تحمل أية أحمال حقيقية أي إن $\delta_n = 0$. ومن المعادلة نجد أنه يمكن التحكم باستمرار وببساطة في Q_G سواء في المقدار أو الاتجاه وذلك:

- تغير E أي بتغير تيار الإثارة للملفات المنتجة للفيض والمجال المغناطيسي.
- تغير زاوية القدرة (أي تغيير القدرة الحقيقية).

ومن المهم معرفة أن التغير في مستوى الإثارة لن يؤثر في القدرة الفعالة الناتجة من المولد P_G ولكن هذا التغير في مستوى الإثارة سوف يؤثر على كل حال في مقدار P_{max} وبالتالي فإن زاوية القدرة هي التي سوف يلحقها التغير دون أن تتغير قيمة القدرة P_G . أما التغير في عزم عمود الدوران فسوف يؤثر في القدرة P_G كما سبق وتم توضيحه سابقا في التحكم في القدرة الفعالة وفي نفس الوقت فسوف تتغير أيضا زاوية القدرة δ_n وبما أنه عادة يعمل المولد عند زاوية قدرها أقل من ٣٠٪ وفي مثل هذه الزوايا الصغيرة يكون $\cos \delta_n$ غير حساس للتغيرات وعلى هذا يكون التغير محدوداً في القدرة غير الفعالة.

٤- ملخص حالات التشغيل:

اعتماداً على مقدار واتجاه كل من القدرة الحقيقية والقدرة غير الفعالة فيمكننا التمييز بين مجموعات التشغيل التالية:

١. يمكن للآلة التي تعمل كمولد والتي تدار بواسطة محرك أساسي يمكن أن يتم تشغيلها بحيث تصبح إما منتجة للقدرة غير الفعالة أو مستهلكة لها.

- يكون المولد منتجاً للقدرة غير الفعالة عندما يكون مثاراً فوق المعدل وتكون:

$$\begin{aligned} 0 < \delta_n < 90, & \quad 0 < \phi < 90 \\ P_G > 0, & \quad Q_G > 0 \end{aligned}$$

- يكون المولد مستهلكاً للقدرة غير الفعالة عندما يكون مثار تحت المعدل وتكون:

$$\begin{aligned} 0 < \delta_n < 90, & \quad -90 < \phi < 0 \\ P_G > 0, & \quad Q_G < 0 \end{aligned}$$

٢. يمكن للآلة أن يتم تشغيلها كمحرك يعطي عزمًا لحمل ميكانيكي ويتم تشغيلها بحيث تصبح إما منتجة للقدرة غير الفعالة أو مستهلكة لها.

- يكون المحرك منتجاً للقدرة غير الفعالة عندما يكون مثاراً فوق المعدل وتكون:

$$\begin{aligned} -90 < \delta_n < 0, & \quad 90 < \phi < 180 \\ P_G < 0, & \quad Q_G > 0 \end{aligned}$$

- يكون المحرك مستهلك للقدرة غير الفعالة عندما يكون مثار تحت المعدل وتكون:

$$\begin{aligned} -90 < \delta_n < 0, & \quad 180 < \phi < 270 \\ P_G < 0, & \quad Q_G < 0 \end{aligned}$$

٣. في أحوال كثيرة يتم تشغيل الماكينة وتكون القدرة الحقيقية مساوية للصفر ويكون هناك حالتان للتشغيل:

١. إذا كانت الماكينة مثارة فوق المعدل فإنها تؤدي نفس الوظيفة كما لو كان ثلاثة مكثفات متوازية لتحسين معامل القدرة. وفي هذا الوضع من التشغيل تعرف الماكينة باسم "المكثف المتزامن" ويكون:

$$\begin{aligned}\delta_n &= 0, & \phi &= 90 \\ P_G &= 0, & Q_G &> 0\end{aligned}$$

- أما إذا كانت مثارة تحت المعدل فإنها سوف تستهلك قدرة غير فعالة وعلى سبيل المثال فإنه في ساعات الليل وعندما يكون الحمل الحقيقي خفيفا بينما تكون خطوط الجهد العالى موصلة ينتج كميات كبيرة من القدرة غير الفعالة والتي يمكن التخلص منها بإثارة المولد تحت المعدل ويكون:

$$\begin{aligned}\delta_n &= 0, & \phi &= 90 \\ P_G &= 0, & Q_G &< 0\end{aligned}$$