تحليل الشبكات الكهربائية

إعداد: د.م. رمضان الطائفي

لمحة تاريخية عن تطور علم الكهرباء:

تميز النصف الأول من القرن التاسع عشر ببعض الاكتشافات الهامة إذ تم إنشاء أول منبع للتيار الكهربائي، ففي عام / 1831 م/ اكتشاف ظاهرة التحريض الكهرومغناطيسي والتي أدت إلى نتائج علمية تطبيقية بالغة الأهمية. ومع تطور الانتاج وازدياد الطلب على المواد الخام (مصادر الوقود) المحلية، كان لابد من نقل تلك المصادر للمصانع (المستهلك) ولذلك نشأت مشاكل بين منابع القدرة وبين المعامل التي تستهلكها، وكانت الطاقة الكهربائية هي الحل الأنسب لنقل الطاقة من مصادرها البعيدة.

في عام / 1882 / نفذ الفرنسي دوبريه أول تجربة لنقل الطاقة ولمسافة /57 كم/ ولكن الاستطاعة المنقولة لا تزيد عن / 30 / حصان بخاري وجهد لا يتجاوز / 2000 فولط / والمردود 25%.

بعد ذلك توسع مقياس تجارب نقل الطاقة الكهربائية من حيث المسافة، والاستطاعة والتوتر والمردود وذلك منذ عام 1885- حتى عام 1889 حيث استمر في لندن خط بطول / 600 كم / وتوتر / 75 كيلوفولت/ إن أول براءة اختراع لمحولة كان في عام / 1882 / وسجلت باسم فوليبر- جيبوس، وخلال الأعوام التي ذكرناها سابقاً يمكننا ذكر الأهم منها:

- عام 1891 - مدينة فرانكفورت - دوليفودو بروفلسكي - 170 كم
مردود 69% - موالي / 25 كيلو فولت /.
- بعد عشر سنوات (بعد أن توضحت مزايا الجمل الثلاثية الأطوار) تم نقل الطاقة بتوتر / 50 كيلوفولت/ ولمسافة /100 كم/.
- في عام 1910 - 1912 تم استثمار خطوط نقل في ألمانيا وأمريكا بتوتر / 100 كيلوفولت/ ولمسافات أكبر من / 500 كم/.
- في عام 1923 - في لوس أنجلوس - خط بتوتر / 287,5 كيلوفولت/
- في عام 1956 - الاتحاد السوفيتي - خط بتوتر / 400 كيلوفولت/ ولمسافة / 891 كم/

- في عام 1965 في كندا - خط بتوتر 735 كيلوفولت - وطول 560 كم.
- في عام 1980 في سورية بدأنا بتزليب خط نقل بتوتر 400 كيلوفولت من سد الفرات - إلى دمشق مروراً بحلب - حماه - حمص.

لا فائدة مرجوة من نقل الطاقة بتوتر أعلى من 750 كيلوفولت، لأن الفوائد الاقتصادية الناجمة عن تقليل الضياعات أو تصغير مقاطع الخطوط تزول بارتفاع تكاليف الأجهزة والعوازل اللازمة لتلك الأشياء، إضافة إلى صعوبات التداخل مع الموجات اللاسلكية.

في السابق لم يكن هناك مقدرة لتوليد القدرة الكهربائية واستهلاكها بدون تشكيل الحمل الكهربائي لكل مقاسم الشبكة المؤلفة من مولد - خط نقل - مستهلك، أما في الحمل الكهربائي فإنه عدة محطات كهربائية (توليد) تعمل على التوازي مرتبطة بشبكة واحدة مقدرة (مركبة)، علماً أنه يمكن بهذا الشكل ربط محطات حرارية مع محطات مائية وغيرها مما يحقق الاستثمار الفعال لمنابع القدرة الكهربائية.

* خلال النصف الثاني من القرن الماضي أمكن تحقيق نجاحات باهرة في تأمين استقرار العمل المتوازي لمحطات التوليد وكذلك زيادة أطوال التمرير لخطوط النقل الطويلة، حيث ارتبط رفع جهود خطوط النقل مع زيادة أطوال الخطوط حيث يوجد ضرورة ماسة لنقل القدرة من أماكن بعيدة.

* في الوقت الحالي تغير الوضع فقد ارتفع التوليد العالمي للطاقة منذ أربعينات القرن الماضي إلى وقتنا الحالي إلى أكثر من عشرة أضعاف، لذلك فقد ازداد استطاعة مجموعة التوليد الحرارية من (٢٥ - ٥٠ ميغاواط) إلى (٢٠٠ - ٨٠٠ ميغاواط) وبالتالي ازداد استطاعة محطات التوليد من (٢٠٠ - ٦٠٠ ميغاواط) إلى (١٠٠٠ - ١٨٠٠ ميغاواط) ويتم حالياً إنشاء محطات توليد باستطاعة هائلة قد تصل إلى أكثر من ٥٠٠٠ ميغاواط.

أنتقلنا إلى ذكر وباختصار أنه تتعلق خطوط الطاقة والبرق الإنارة العامة يؤدي إلى تشويه منظر المدن مما دعى إلى التقليل

في توزيع القدرة تحت الأرض وأول من فكر بذلك هم أول من اخترع خطوط التلغراف، ومن بينهم مورس، روناليدز- وبيتيون وكامرون

* هولي (١٨١٦ - ١٨٧٧). وعند ظهور نظام الإنارة أي بعد حوالي ٤٠ عاماً والذي التشمه أديسون لم يجروا الكثير في مجال توزيع القدرة الكهربائية باستثناء رغبة أديسون بعمل توزيع كهربائية تحت الأرض لمدينة نيويورك حيث كانت عبارة عن قضبان نحاسية معزولة بواسطة الخيش، ثم تطور اكتشاف العوازل لخطوط النقل منذ عام ١٨٤٥/ حيث اكتشف فوديير المطاط المكبرت، حيث استخدم في الشبكات البرقية فقط من عام ١٨٨٠ حيث استعمل أول عازل بأوراق مشبعة بالزيت في كابلها تاتي من قبل د.آ. بارتي، ولمتير عام ١٨٩٧/ فولادة أول كابل معزول بالورق المشبع بالزيت كعازل لخط نوتر / ١٢,٨ كيلوفولت/ ثم مدّه في أمريكا بين فيلادلفيا بوسطن وسانت بول.

* ثم تنامى التطور في العوازل وصنعها بعد استعمال السليغ في مدينة الطابلاج، من عام ١٩٢٧/ حيث تم اختراع عوازل من الورق المشبع بالزيت ولكن تحت ضغط عالي مما يؤدي إلى زيادة متانة العوازل الكهربائية وسمي هذه البراءة باسم العالمين فيشرو وآتكينسن، ثم عدل الطابل وعازليته التي أصبحت تحت ضغط ٤/ كغ/سم٢/ واعتبار أول خط صناعي معدل حيث تم تمديد الطابل ضمن أنابيب فولاذية.

* إن نقل القدرة الكهربائية بواسطة الشبكات النور المتناوب لمسافات طويلة يسبب بعض الصعوبات الفنية المتعلقة باستقرار الشبكات لكن التيار المستمر يتجنب تلك الصعوبات ويفتح مجالاً جديداً في هذا المضمار، إلا أن النقل بالتيار المستمر عالي الجهد يتطلب أجهزة وأدوات خاصة لتحويل التيار من متناوب إلى مستمر من جهة الإرسال ثم إعادته إلى تيار متناوب في جهة الاستقبال. إذ أن توليد الطاقة وتوزيعها لابد وأن يتم بالتيار المتناوب نظراً لخواص الجيدة إضافة إلى أن الأجهزة المطلوبة لذلك مطلقة جداً مما يجعل استعمالها للمسافات القصيرة مطلقة جداً، لكننا وكما ذكرنا سابقاً الشبكات التيار المتناوب في حالة الشبكات الطويلة، وقد تم في العقد الأخير

الماضي انشاء عدة سشبكات نقل القدرة بالتيار المستمر أهمها خط النقل بين فولغاراد و دونباس في الاتحاد السوفيتي سابقاً حيث تم نقل استطاعة قدرها (٧٥٠ ميغاواط) إلى مسافة ٩٥٠ ميل / وجهد ٨٠٠ كيلوفولت /.

* لا بد في ختام هذه اللمحة التاريخية من التعريج على مفهوم التيار ثلاثي الأطوار، إذ هو نظام كهربائي معتمد لأطوار خاص بالتيار المتردد (المتناوب) وهو المستعمل والأكثر شيوعاً في محطات الطاقة التي تنتج الكهرباء، ويسمى بثلاثي الأطوار لأنه ثلاث تيارات تسير في ثلاثة أسلاك بتردد واحد ولكل تيار منهم يبدأ بطور متزاح عن الآخر بمقدار (120°) أي ثلث دائرة وهو الأكثر انتشاراً في تشغيل المحركات ذات القدرة العالية في المصانع، ويسير بواسطتها المترو والقطارات الكهربائية.
هذا النظام يتمتع بقدرة عالية واستقرارية كبيرة وكفاءة ممتازة بالنسبة لنقل الكهرباء وإنتاج الطاقة الحركية في محركات التيار الثلاثي الأطوار حيث تصل كفاءتها بين (80% - 97%).
يستخدم التيار الثلاثي الأطوار في نقل الكهرباء بهدف توفير المواد والكفاءة العالية (فاقد بسيط للقدرة).

* نظام القدرة الكهربائية هو مجموعة من الأجهزة والأدوات التي تقوم باستلام جميع أنواع (أشكال) الطاقة وتحويلها وتوزيعها واستعمالها لذا فهو يتألف من:
- محطات توليد
- خطوط النقل
- شبكات التوزيع.

لذا فهو عبارة عن عدد كبير من محطات التوليد ترتبط مع بعضها بواسطة شبكات كهربائية بحيث تكون الكهرباء عاملاً للاستثمار من قبل المستهلكين في المنزل والمصنع والمطار، وبما أن الحمولات الكهربائية المطلوبة من المستهلكين عشوائية الصفة فهي لا تخضع لسيطرة المزاج الكهربائي مما يستدعي قيام المهندسين في تلك المؤسسات إلى دراسة والتنبؤ بمتطلبات الطاقة في المستقبل لذلك يقومون بالتخطيط وتشييد محطات التوليد اللازمة مستقبلاً إضافة إلى تشييد شبكات النقل اللازمة لمجابهة تلك الحمولات بأفضل الوسائل فنياً واقتصادياً.

* ...ات أنظمة القدرة الكهربائية :

إن أهم ما يميز نظام القدرة الكهربائية والذي يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار هو:

١- التوليد والاستهلاك آنيان ولا يسمح باختلال التوازن بين الاستطاعة المولدة والاستطاعة المستهلكة.

٢- ضرورة وجود أجهزة آلية خاصة تؤمن مواصفات الطاقة المطلوبة: (التردد - الجهد - التيار - الجماليات ... الخ).

٣- إن تطور نظام القدرة الكهربائية مع الزمن ضمن حدود معينة يتبع للعلاقات والجمل التاريخية.

٤- تغير ثوابت النظام بشكل عشوائي مع الزمن.

* شبكات الارتباط:

يمكن أن ترتبط أنظمة القدرة مع بعضها البعض لتشكل «شبكات الارتباط» حيث يحقق هذا الربط فوائد عديدة أهمها:

١- تخفيض قيمة الاحتياط الطارئ في الشبكة.

٢- استعمال أفضل للاستطاعة والقدرة الناتجة عن محطات التوليد المائية.

٣- تخفيض القيم الأعظمية لحمولات الأنظمة الجزئية التي تتألف منها شبكة الارتباط.

٤- تسهيل عمل الجملة عند اختلاف الحمولة الموسمي.

٥- تسهيل عمل الجملة عند الصيانة والأعطال.

ومن المهم أن نفهم بأن الشبكة الكهربائية هي الوسط الذي يربط منابع التغذية الكهربائية مع المستهلكين.

* نظام عمل الشبكة الكهربائية:

تتغير حالة الشبكة الكهربائية بشكل مستمر ودائم تبعاً لتغير قيمة الحمولة، والذي يكون ذا طبيعة عشوائية خاصة في الشبكات السكنية، لذلك يتم حساب ثوابت الشبكة فقط من درجة معينة من الاحتمال.

من أجل الدراسة العلمية لعمل الشبكة الكهربائية فإننا سنقسم إلى أنظمة عملها والذي يقصد بها (نحجم) العمل أو التشغيل،

وهذا يحدد بداية ونهاية العمل للشبكة في أي لحظة زمنية كالتيار والجهد، وبما أن الحمولات الكهربائية تتغير بشكل دائم لذلك سيكون لدينا عدة أنظمة عمل (نظام العمل عند الحمولة الأعظمية - نظام العمل عند الحمولات الأصغرية - نظام العمل عند فراغ ... وغيرها).

إن الحمولة الأعظمية تحدد آلية فنية ممكنة لانحراف الجهد في مختلف نقاط الدارة، أما الحمولة الأصغرية فتحدد عدد المولدات الأصغري اللازم لتغطية الحمولة المطلوبة.

وبما أن نظام القدرة الكهربائية عبارة عن مجموعة من العناصر التي تعمل مع بعضها البعض بشكل آني وتتبادل التأثير على بعضها البعض في آن واحد لذلك لا يكفي دراسة الحوادث الكهربائية الناتجة عن عمل النظام الطبيعي بل لابد من أخذ تغيراتها المستمرة بعين الاعتبار.

بصورة عامة نميز بين ثلاثة رجيمات لعمل الشبكات الكهربائية:

أ- نظام العمل الطبيعي (نظام الحالة الدائمة).

ب- نظام العمل بعد العطل: وهو النظام الذي تعمل بموجبه الشبكة بعد حدوث عطل ما، أو بعد فصل جزء أو عدة أجزاء من الشبكة، وقد يكون العمل في هذا النظام للشبكة بعيداً عن مواصفات الفنية أو الاقتصادية.

ج- نظام عابر: وفيه تنتقل الشبكة من نظام لآخر.

إن النظامان الأول والثاني مستقران إلا أن النظام الثالث قد يكون غير مستقر أثناء عمل استقرار الشبكة، إذ أنه ينتج عادة عن تغير حاد في عمل الشبكة، كما هو الحال عند حدوث دارة قصر تؤدي إلى عطل وفصل أجزاء من الشبكة.

لذلك من أهم دراسات الاستقرار هو التحقق من مقدرة الشبكة أو الجملة على تحمل الحوادث العابرة المختلفة والتي يمكن أن تحدث وذلك لضمان استمرارية التغذية الكهربائية.

حساب الشبكات الكهربائية :

تعقد عمر طرق حساب الدارات الكهربائية بأكثر من / ١٠٠ سنة / ٦
وقد اعتمدت الدراسات على أعمال (كيرشوف وماكسويل).
بعد ذلك وبوقت طويل واستنادا إلى الحلول الرياضية الأخيرة تم انشاء
الشبكات الكهربائية وبالوقت ذاته ومع تطور الشبكات الكهربائية
ظهرت مسائل جديدة صنفت إلى مجموعتين :

P- حساب الحالة الدائمة للشبكات المستشعبة المعقدة .

ب- دراسة الحوادث العابرة الناتجة في الجمل الكهربائية من التقريغ الجائي
(أشهرها حالات الأعطال) أثناء الاستثمار .

تشمل الحالة (ب) الأعطال غير المتناظرة التي تظهر في الجملة عند تردد
الشبكة ، وكذلك الظواهر الجوية ودارات الفتح والاغلاق (التبديل)
التي تؤدي إلى ظهور ظواهر عابرة تمر بسرعة خلال عناصر الجملة مما
يؤدي إلى ظهور حالات ومسائل معقدة .

عند دراسة وحساب الشبكات الكهربائية لابد من أخذ «موثوقية» عملها
بعين الاعتبار والمقصود بموثوقية التغذية الكهربائية هو مقدرة / الجملة
على ضمان / استمرار التغذية إلى الحمولات / المستهلك في أية لحظة زمنية.
وهذا يتعلق برأس المال المبذول عند الانشاء والذي يجب أن يؤخذ بالموازنة
مع الأضرار التي تؤدي إلى أضرار بالغة في حال كانت الموثوقية منخفضة .
إن تحديد المعطيات الأولية لايجاد الحمولات الكهربائية والموثوقية تحتاج
عن أبحاث خاصة تجري على الشبكة وعلى النماذج الرياضية للجمل الفيزيائية
التي تتألف منها الجملة الأصلية وذلك بالاعتماد على طرق :

- نظرية الاحتمالات .
- الاحصاء الرياضي .
- نظرية الموثوقية .

* تحليل الشبكات الكهربائية :

يدخل ضمن هذه التسمية البنود الآتية :

P- دراسات الحمولة : تعيين التوتر والتيار والاستطاعات الفعلية والردية وعامل الاستطاعة في مختلف نقاط الدارة .

* ب - الأعطال وصيانتها : وذلك لتقييم مواصفات القواطع المثبتة اللازمة في مختلف نقاط الشبكة وتقدير الزوابل (الرليبات) التي تحمل تلك القواطع .

ج - التحميل الاقتصادي : أي الحصول على مردود أعظمي من محطات التوليد وذلك حسب نوعها وموقع المحطة بالنسبة لمصدر الوقود ، وأيضاً بعد المحطة عن مركز الاستهلاك حيث تزيد الضائعات في القدرة في خطوط النقل ، وهكذا فإن عاملي « كلفة الانتاج » و « ضائعات النقل » مرتبطان ببعضهما ارتباطاً وثيقاً حيث يجب التوفيق بينهما للحصول على أفضل النتائج .

* استقرار الشبكات :

والمقصود باستقرار الشبكة هو استقرار الجملة الكهربائية أي مقدرة الجملة على المحافظة على العمل المتوازي لمحطات التوليد الكهربائية ، لأنه حدوث الأعطال قد يخرج الجملة عن استقرارها والمولدات عن توافقها مما يؤدي إلى انقطاع التغذية عن المستهلكين .

يميز عادة بين شكلين من أشكال الاستقرار :

1- الاستقرار الساكن (الستاتيكي أو الدائم) : وهو مقدرة الجملة على استعادة وضع العمل الطبيعي من أجل التغيرات الطفيفة التي تتعرض لها .

2- الاستقرار الديناميكي (العابر) : وهو مقدرة الجملة على المحافظة على الاستقرار من أجل تغيرات الاستطاعة ، التيار والجهد (تغيرات كبيرة) على أجزائها المختلفة (مثلاً عند فصل الخطوط ، عند حدوث الأعطال القصيرة في إحدى نقاط الدارة) .

لذلك ينبغي على مهندس الشبكات دراسة مسائل الاستقرار مع الاهتمام باتخاذ الإجراءات اللازمة لتحسين الاستقرار .

تتطلب دراسة استقرار الشبكات بالطرق التحليلية بسرعة ، الدان ودراسة استقرار عدة آلات تتطلب استخدام الحواسب الكبيرة والحواسب الالكترونية إضافة لاستخدام برامج كمبيوترية خاصة .

جامعة حماة
الكلية التطبيقية

* تصنيف الشبكات الكهربائية :

إن للشبكة الكهربائية هدفين يمكن تحقيقهما بوظيفة عالية وبآمن واصروطها:

أ - تغذية المستهلكين بالطاقة الكهربائية .

ب - نقل القدرة الكهربائية إلى مسافات بعيدة .

ومن أجل نقل القدرة وبأقل خسائر يتم بالتيار المتناوب ثلاثي الطور فإن كل شبكة تتميز بجهد اسمي معين يحدد درجة عازلية الأجهزة المتصلة بها .

وبقصد التبسيط تقسم الجهود الاسمية إلى مجالات مختلفة في بعض الأحيان :

- الجهد المنخفض .
- الجهد المتوسط .
- الجهد العالي .
- الجهد العالي جداً .

وبصورة عامة تقسم الجهود إلى :

- جهد التوزيع : من / 110 فولت حتى 33 كيلو فولت / .
- جهد التوليد : من 6,3 كيلوفولت حتى 33 كيلوفولت / .
- جهد النقل : من 33 كيلوفولت حتى 750 كيلوفولت / .

أما في الجمهورية العربية السورية ، فقد تم تبني الجهود التالية لنقل القدرة الكهربائية وتوزيعها : - جهد النقل الرئيسي هو / 230 - 400 / كيلو فولت .

- جهد النقل الثانوي هو / 66 / كيلوفولت .
- جهد التوزيع الرئيسي هو / 20 / كيلوفولت .
- جهد التوزيع الثانوي هو / 220 - ~~380~~ / فولت .

يمكننا أيضاً أن نقسم الشبكات الكهربائية إلى :

١- شبكة داخلية وخارجية .

٢- شبكة هوائية ، كابلية ، أرضي أو عبر مسبح .

٣- شبكات المدن ، شبكات الأرياف ، الشبكات الصناعية .

٤- شبكات مفتوحة ، شبكات بصف مغلقة ، شبكات مغلقة (حلقية) .

جامعة حماة

* نظام الجهد في الشبكة :

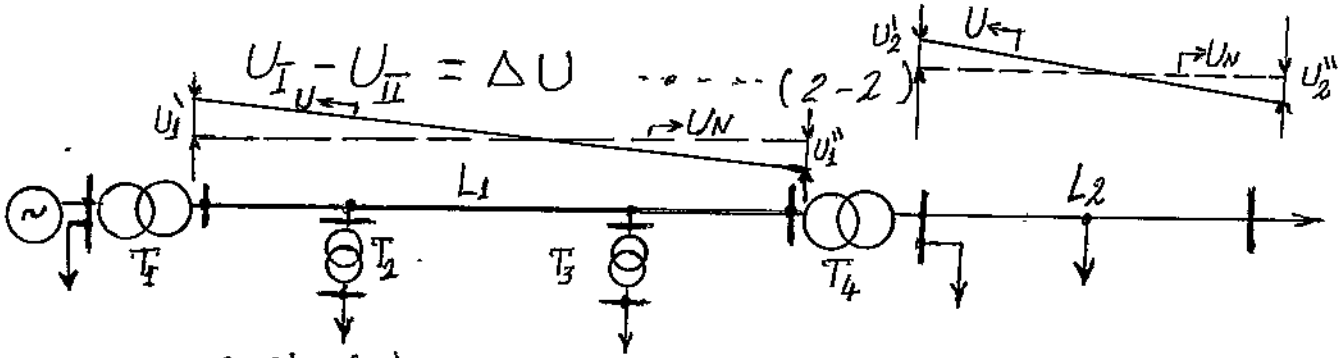
نقصد "بنظام الجهد" في الشبكة - بأنه مجموعة القيم الطلبية للجهود في جميع نقاط الشبكة ، تصمم مختلف عناصر الشبكة الكهربائية وكذلك الأجهزة الكهربائية لتعمل عند جهد اسمي معين ، ويمكنها أن تعمل عند جهود مختلفة عن الجهود الاسمية ولكن ضمن حدود معينة ، لذلك من المرغوب المحافظة على الجهد في نقاط وصل الأجهزة الكهربائية إلى الشبكة .

إن عناصر الشبكة تتمتع بمقاومة معينة ، لذلك فإن مرور التيار فيها يؤدي إلى تغير الجهد ، وكذلك فإن القيمة اللحظية للجهد في مختلف نقاط الشبكة تكون مختلفة هي الأخرى ، وهذا الاختلاف يحدد بقيمتين (القيمة المطلقة أو القيمة الفاعلية) .

فإذا كانت $\dot{U}_I$ القيمة الفاعلية للجهد في العقدة (I) و $\dot{U}_{II}$ القيمة الفاعلية للجهد في العقدة (II) نستطيع أن نكتب بعد مرور التيار من (I) إلى (II) :

$$\dot{U}_I - \dot{U}_{II} = \Delta\dot{U} \quad \cdots\cdots (1-2)$$

$$U_I - U_{II} = \Delta U \quad \cdots\cdots (2-2)$$



تدعى القيمة $\Delta\dot{U}$ - هبوط الجهد بين العقدتين (I) و (II) .

ΔU - ضياع الجهد بين العقدتين (I) و (II)

لذلك نستطيع القول من الناحية الفيزيائية والرياضية بأن هبوط الجهد هو قيمة شعاعية (عقدية) بينما ضياع الجهد هو قيمة (طبقية) حقيقية (مطلقة) .

يعتبر قيمة ضياع الجهد الأعظمية في شبكة ذات جهد واحد قيمة جيدة ، حيث تساوي الفرق العددي بين أكبر وأصغر جهد في نقطتي بداية الشبكة ، وهذه تمثل (بشكل عام) مؤشراً لاقتصادية عمل شبكة النقل .

جامعة حلب

إنه الفرق بين القيم الحقيقية للجهد /U/ في أية نقطة، وقيمة الجهد الاسمية /UN/ في النقطة ذاتها ندعى بانحراف الجهد وهي تعطى:
بنسبة مئوية من الجهد الاسمي وفقاً للعلاقة:

$$V\% = \frac{U - U_N}{U_N} * 100\ \% \quad \text{.... (3-2)} \qquad \text{(انحراف الجهد)}$$

ملاحظة: في حالات الحالة الدائمة للشبكات نفترض أن نظام الجهود يتغير بشكل بطيء جداً مع الزمن.

* ثوابت التشغيل الموحدة:

تميز لكل شبكة نوعين من الثوابت:

أ- ثوابت عناصر الشبكة وهي (المقاومات، المفاعلات، عوامل تحويل المحولات ... الخ).

ب- ثوابت التشغيل وهي (قيم التيارات، الجهود أو التوترات، الاستطاعة الظاهرة أو الفعلية أو الردية ... الخ).

في أغلب الأحيان نقبل بأن ثوابت عناصر الشبكة تبقى ثابتة ولا تعتمد على نظام التشغيل، أما ثوابت نظام التشغيل فتحسب بشكل مباشر من قيم الجمل التي تتغير مع الزمن وهي تحدد وتميز نظام التشغيل.

من أجل كل نوع وكل عنصر من عناصر الشبكة أو أجهزتها تحدد ثوابت التشغيل محددة بدقة بواسطة قيم قياسية وشروط معينة، فمثلاً إن قيم التيارات المسموحة تتحدد بشروط السخونة، وقيم الجهود المسموحة تتحدد في شبكة النقل حسب شروط العازلية وشروط سخونة فولاذ المحولات النافضة للجهد، وفي شبكات التوزيع بشروط عمل الأجهزة الكهربائية المنزلية.

إن قيم الاستطاعة مميزة خصوصاً بالنسبة للآلات الدوارة، كما أن الاستطاعة الفعلية لمحولة المولد تتحدد بالاستطاعة المقابلة للحمل الذي يولد المنوبة. عادة يسمح بتجاوز قيم الجهود الاسمية للعوازل بحدود 20 % في شبكات ذات جهود أقل من 25 /كيلوفولت، بينما قيمة انحراف الجهد بالنسبة لمنظم الأجهزة الكهربائية يسمح بـ ±5 % / وهذا الانحراف حيث تختلف هذه القيمة

حسب طبيعة المستهلكين في الريف أو المدينة أو في الصناعة.

* المقاومة، والمفاعلة لنواقل الخطوط الهوائية والكابلات:

تعتمد مقاومة الناقل على مادة الناقل ومقطعه، يستعمل حالياً نواقل نحاسية أو ألمونيومية أو من خلائط النحاس والألمنيوم، تحسب المقاومة بالعلاقة:

$$R_0 = \rho \frac{L}{A} \quad OHM/M$$

$$R_0 = \frac{1}{\gamma A} \quad OHM/M \qquad \left.\right\} \cdots (4-2)$$

$$R_0 = \frac{1000}{\gamma A} \quad OHM/KM$$

ρ - المقاومة النوعية للمعدن (مادة الناقل).

γ - الناقلية النوعية للمعدن (مادة الناقل).

L - طول الناقل (بالمتر M).

A - مقطع الناقل (بالمليمتر المربع mm^2).

بالحساب تبين بأن ($\gamma = 53\ \Omega^{-1}$ للنحاس) و ($\gamma = 31{,}7\ \Omega^{-1}$ للألمنيوم)

يحدد المجال المغناطيسي المتشكل حول، وفي داخل كل ناقل الممانعة التحريضية له. وهذه تحسب من العلاقة:

$$x_0 = 0{,}1445 \log \frac{D_{GMD}}{R} + 0{,}0157 \quad \cdots \quad OHM/KM \qquad \cdots (5-2)$$

$$D_{GMD} = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}} \qquad \text{البعد المتوسط بين النواقل} \qquad \cdots (6-2)$$

حيث R - نصف قطر الناقل (سم).

D_{12} - البعد بين الناقلين 1 و 2.

D_{13} - البعد بين الناقلين 1 و 3.

D_{23} - البعد بين الناقلين 2 و 3.

* الناقلية الفعالة والناقلية السعوية لخطوط النقل :

تحدد الناقلية السعوية التي تشكلها الأطوار بالعلاقة :

$$b_o = \frac{7,58}{\log \frac{D_{GMD}}{R}} \cdot 10^{-6} \quad \frac{1}{OHM/KM} \rightarrow MHO \quad \text{---- (7-2)}$$

حيث : $\frac{1}{OHM} = MHO$ – الناقلية السعوية (المتأثرة) للناقل

عند ربط الخط يمكن أن ينشأ تأين لطبقة الهواء المحيطة بسطح الناقل ، هذه الظاهرة تدعى بـ (ظاهرة الكورونا) وتحدث عندما تكون شدة المجال الكهربائي على سطح الناقل أكبر من قيمة معينة (حرجة أو حدية) .

إن ضياع الطاقة الناتج عن ظهور الكورونا على نواقل الخطوط الطويلة يجب أن تقابل بناقلية فعالة معينة ، إلا أنه من المفضل في حالات التصميم أخذ بعين الاعتبار ضياع الاستطاعة بسبب الكورونا عن شكل استطاعة إضافية وذلك لتجنب إضافة ناقلية تستهلك استطاعة فعلية .

إن زيادة القطر الخارجي للناقل فوق القيمة الحدية المدروسة يمنع ظهور الكورونا وعدم أخذ ضياعات الاستطاعة الفعلية بسببها بعين الاعتبار .

أما طريقة حساب ضياعات الكورونا فهي موجودة في مناهج خاصة تعنى بتصميم ودراسة الجهد العالي ، حيث يتم عادة تحديد ضياع الاستطاعة الفعلية من أجل أمتار الخط ذات الطول (200 – 300) كم ، حيث تمثل هذه الأجزاء بدارتها المطافئة على شكل (π) عن أن يوضع في نظام الانتقال محولات إضافية تقابل ضياع الاستطاعة بسبب الكورونا في الجزء المعني .

* الخواص الحرارية للنواقل والطبلات :

يمكن بالاختصار ذكر معادلة التوازن الحراري للطبل وهي :

$$I^2 R_o = K A (\theta_c - \theta_a) \quad \text{---- (8-2)}$$

حيث : K – عامل النقل الحراري .

A – سطح الناقل المعرض للتبادل الحراري .

θ_c – درجة حرارة الناقل .

θ_a – درجة حرارة الوسط الخارجي المحيط بالناقل .

جامعة حلب
الكلية التطبيقية

* حساب المفاعلية الطرفية (OHM/KM) والمتأثرية السعوية (1/(OHM/KM))
لخط ذي نواقل حزمية :

سبق وأن تعرفنا على معادلات حساب المفاعلة الطرفية والمتأثرية السعوية إضافة إلى المقاومة الأومية وذلك لخطوط ونواقل السلك بالاعتماد على المراجع المعتمدة والمعادلات المستنتجة، ولكن وفي الحياة العملية توجد خطوط نقل (ذي نواقل حزمية) فهي تحدد بالمعادلات التالية:

$$x_o = 0{,}1445 \log \frac{D_{GMD}}{R_e} + \frac{0{,}0157}{n} \quad \text{..... 1}$$

$$b_o = \frac{7{,}58}{\log \frac{D_{GD}}{R_e}} \cdot 10^{-6}$$

حيث :

n - عدد النواقل في الطور .

R_e - نصف القطر المكافئ والذي يعادي بالسعة للطور المنطور إلى ناقلين أو ثلاثة نواقل :

$$R_e = \sqrt[n]{R\, a_{GMD}^{n-1}}$$

R - نصف قطر الناقل الواحد .

a_{GMD} - البعد المتوسط الهندسي بين نواقل الأطوار .

وإذا كانت النواقل متوازية أفقياً فإن :

$$a_{GMD} = 1{,}26\, D$$

حيث :

D - البعد بين ناقلين متوازيين ومتجاورين .

ومن أجل الخطوط الأطول من / 300 كم / ، فعند تعيين مقاومات الدارة المكافئة أو مفاعلاتها أو متأثرياتها لابد من إدخال عوامل تصحيح معينة تأخذ بعين الاعتبار أثر التوزيع المنتظم للثوابت .
فمن أجل خط طوله بين /1000-300/ كم / نستطيع أن نكتب :

$$r = r_o L K_r$$
$$x = x_o L K_x$$
$$b = b_o L K_c$$

* حساب الشبكات الكهربائية :

في الحالة العامة تكون الجهود والتيارات في الشبكات الكهربائية غير جيبية وغير متناظرة ، ولكن ونقصد التبسيط نفترض أن الجهود والتيارات متناظرة وجيبية ، وبناءً على هذا الافتراض فإننا نعتبر أن توابع الأطوار الثلاثة متماثلة (التيارات ، الجهود ، الاستطاعات) ، في هذه الشروط نعطى الاستطاعة الظاهرة $\dot{S}$ للذارات الثلاثة الأطوار بالمعادلة :

$$\dot{S} = \sqrt{3}\ \dot{U}\ \dot{I} = P + jQ \quad \text{---- } (3-1)$$

حيث : $\dot{I}$ - القيمة المعقدة للتيار في فرع الشبكة .

U - القيمة المعقدة للجهد المركب (بين طورين) في الشبكة ، وهو يساوي فكا مضروبة بالجهد البسيط (بين خط وحيادي) .

P, Q - الاستطاعتان الفعلية والردية .

في الوقت الراهن هناك عدد كبير من طرق الحساب المختلفة حيث تتمتع كل طريقة بمزايا جيدة وبساوئ معينة ، ويكون لها مجال للاستعمال ، وكل منها يعتمد على نوع الشبكة وعلى مخططها وعلى دقة المعطيات الأولية ودقة النتائج المطلوبة إضافة إلى الوسائل المستعملة في الحساب وغير ذلك .

في شبكات التوزيع تكون أطوال أفرع الشبكة وحمولاتها غير كبيرة نسبياً كما أن التوترات في عقد الشبكة المختلفة لا تختلف كثيراً عن بعضها بالقيمة أو بالطور ، لذلك فإن حسابات الاستطاعة في كل جزء من أجزاء الشبكة تكون صغيرة لذلك فإن حسابات هذه الشبكات تكون تقريبية وبطرق مبسطة .

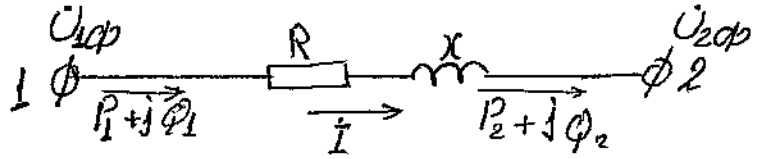
في شبكات النقل تكون أطوال الخطوط وحمولات الشبكة كبيرة ، لذلك يقتضي الأمر إجراء الحسابات بدقة مع أخذ بعين الاعتبار حسابات الاستطاعة على مختلف أجزاء الشبكة وكذلك الاختلاف في التوتر بين مختلف العقد .

تتعقد حسابات الشبكات الكهربائية بشكل ملحوظ عند وجود عناصر غير خطية ، أهم العناصر غير الخطية في الشبكة هي المحولات التي تقطع باستطاعاتها ، في هذه الحالة تصير المعادلات التي تربط بين التيارات والتوترات غير خطية

الدرجة الثانية ، لذلك لا تعتبر تباشرة استعمال طرق الجبر الخطية
ولتبسيط حساب المخططات غير الخطية تستعمل طرق التقريب
المتتالي وتقريب مميزات العناصر غير الخطية بمميزات تقريبية خطية.

* حساب جزء من شبكة كهربائية :

لنأخذ خطاً هوائياً ثلاثي الطور ، ونرمز للوتر بين طور والحيادي
في بداية الخط بـ $\dot{U}_{1\varphi}$ ، وفي نهاية الخط بـ $\dot{U}_{2\varphi}$ ، يجري في الخط تيار
قدره $\dot{I}$ يتأخر بزاوية φ_2 عن الوتر البسيط $\dot{U}_{2\varphi}$ كما في الشكل (3-1):

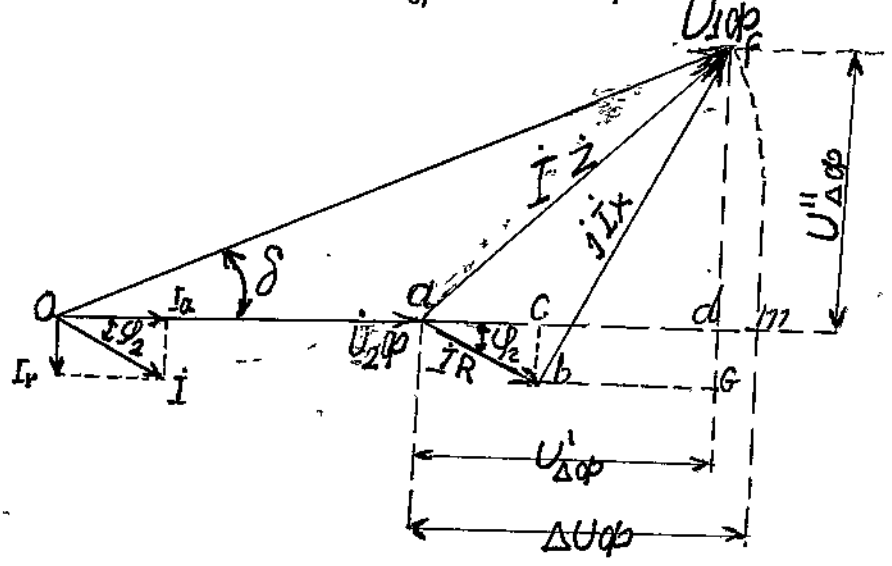


شكل (3-1)

الاستطاعة في بداية الخط P_1+jQ_1 وفي نهاية الخط P_2+jQ_2 ،
ولنفرض أنه $\dot{U}_{2\varphi}$ ، $\dot{I}$ ، φ_2 معلومة ، والمطلوب إيجاد $\dot{U}_{1\varphi}$ والزاوية
δ بين الشعاعين $\dot{U}_{1\varphi}$ و $\dot{U}_{2\varphi}$.

من الواضح أنه :

$$\dot{U}_{1\varphi} = \dot{U}_{2\varphi} + \dot{U}'_{\Delta\varphi} + j\,\dot{U}''_{\Delta\varphi} \quad \cdots (3-2)$$



الشكل (3-2)

المخطط الشعاعي للتيارات والجهود في خط هوائي

حيث :

$U'_{\Delta\phi}$ = المركبة الطولانية لهبوط التوتر في الخط (القطعة ad)

$U''_{\Delta\phi}$ = المركبة العرضانية لهبوط التوتر في الخط (القطعة df)

الشكل (3-2)

من المعادلة (3-2) يمكننا أن نكتب :

$$\dot{U}_1 = U_2 + U'_\Delta + j\,U''_\Delta \quad \text{.....(3-3)}$$

ملاحظة: عادة تكون الزاوية δ بين متجهي التوترين في بداية الخط ونهايته صغيرة حيث يمكن إهمال القطعة dm وبالتالي صنبع التوتر في الخط يساوي القطعة (dd) وفقاً للشكل (3-2) بالنسبة للمركبة الطولية لهبوط التوتر في الخط .

$$\Delta U = \sqrt{3}\,(I_a R + I_m X) \quad \text{.....(3-4)}$$

حيث : $U''_\Delta + U'_\Delta = \Delta U$

- التوترين المركبين في بداية ونهاية الخط. $\begin{cases} U_1 \\ U_2 \end{cases}$

ومنه نكتب :

$$U_1 = U_2 + \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} + j\,\frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} \quad \text{.....(3-5)}$$

حيث : $\begin{cases} P_2 \\ Q_2 \end{cases}$ - الاستطاعتان الفعلية والردفعلية للأطوار الثلاثة في نهاية الخط .

بنفس الطريقة والمحاكمة نجد أن :

$$U_2 = U_1 - \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1} - j\,\frac{P_1 X - Q_1 R}{U_1} \quad \text{.....(3-6)}$$

إذا كانت التوترات في بداية ونهاية الخط غير معروفة ، فإنه يمكن تقدير المركبة الطولية والعرضية لهبوط التوتر بالعلاقتين

$$\left.\begin{aligned} U'_\Delta &= \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_N} \\ U''_\Delta &= \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_N} \end{aligned}\right\} \quad \text{.....(3-7)}$$

حيث :

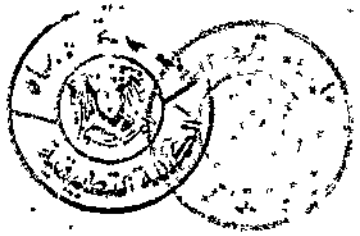
U_N - التوتر الاسمي للشبكة .

ملاحظات هامة : من أجل حسابات خطوط (110 كيلوفولت) وما دونه يمكن إهمال المركبة العرضانية لهبوط التوتر مما يؤدي إلى خطأ لا يتجاوز جزء مئوية (1%) في هذه الحالة يكون :

$$\left.\begin{aligned} U_1 &\simeq U_2 + \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} \\ U_2 &\simeq U_1 - \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1} \end{aligned}\right\} \quad \cdots (3-8)$$

حيث :

$\left\{\begin{matrix} U_1 \\ U_2 \end{matrix}\right.$ التوتر المركب في بداية ونهاية الخط .



* حساب شبكات التوزيع :

كما ذكرنا آنفاً فإن أطوال شبكات التوزيع قصيرة ، كما أنه تتم صناعة التوتر وصناعة الاستطاعة على الأجزاء المختلفة كذلك صغيرة ، لذلك عند حساب هذه الشبكات نهمل صناعات الاستطاعة ، وعادة تكون التوترات في مختلف عقد الشبكة قريبة من التوتر الاسمي لذلك تحسب تيارات الحمولة بدقة كافية باستعمال التوتر الاسمي :

$$\dot{I} = \frac{\dot{S}}{\sqrt{3}\, U_N}$$

حيث تكون الاستطاعة الظاهرية في هذه الحالة خطية ، وعندما توترات شبكات التوزيع صغيرة نسبياً لذلك لا تبدي الناقلات السعوية للخطوط أية تأثيرات على هامش الشبكة ، لذلك في الاستطاعة الظاهرية لخطوط شبكات التوزيع يؤخذ بعين الاعتبار فقط الممانعة الطولانية .

في شبكات التوزيع المفتوحة ، فإن التيار أو الاستطاعة على أي جزء من الشبكة (m) تتحدد مباشرة بواسطة جمع n حمولة تتغذى من القسم المذكور =>

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_i &= \frac{1}{\sqrt{3}\, U_N} \sum_{i=1}^{n} \dot{S}_i \\ \dot{S}_i &= P_i + j Q_i = \sum_{i=1}^{n} (P_i + j Q_i) \end{aligned}\right\} \quad \text{---(3-9)}$$

أما صناعة التوتر على أي جزء (m) من الشبكة (من مخطط الشبكة) يحدد بالاعتماد على المعادلتين (3-4) و (3-7) وفقاً لما يلي:

$$\Delta U = \frac{1}{U_N} \sum_{i=1}^{m} (P_i R_i + Q_i X_i) \quad \text{---(3-10)}$$

وعندما تكون مقاطع النواقل في جميع أجزاء الشبكة (m) متماثلة فإن قيم ممانعات الخطوط يبقى نفسها بالنسبة لجميع الأجزاء ، عندها تأخذ العلاقة (3-10) الشكل :

$$\Delta U = \frac{1}{U_N} \sum_{i=1}^{n} (P_i R_{oi} + Q_i X_{oi}) \quad \text{---(3-11)}$$

جامعة حماة
الكلية التطبيقية

حيث : R_{oi} ، X_{oi} - المقاومة والمفاعلة - على التوالي من النقطة (o) إلى النقطة (i) للشبكة .

أما ضياعات الاستطاعة على الجزء (i) من الشبكة فإنه يحدد بالعلاقة :

$$\Delta P = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} R$$

$$\Delta Q = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} X$$

وبالنسبة للشبكة المؤلفة من (m) جزءاً ، وبغض النظر عن طريقة الاتصال للأجزاء فإن ضياعات الاستطاعة تساوي :

$$\left.\begin{aligned} \Delta P &= \sum_{i=1}^{m} \Delta P_i = 3\sum_{i=1}^{m} I_i^2 R_i = \frac{1}{U_N^2}\sum_{i=1}^{m}(P_i^2 + Q_i^2)R_i \\ \Delta Q &= \sum_{i=1}^{m} \Delta Q_i = 3\sum_{i=1}^{m} I_i^2 X_i = \frac{1}{U_N^2}\sum_{i=1}^{m}(P_i^2 + Q_i^2)X_i \end{aligned}\right\} \quad \text{---(3-12)}$$

إن قيمة ضياع الاستطاعة الفعالة خلال أجزاء الشبكة تحدد مردود نقل القدرة ، عادة لا تزيد قيمة ضياع الاستطاعة الفعلية في شبكة وصيد التوتر (تغذى من منبع واحد) عن (5٪) أما قيمة الاستطاعة الردية للخطوط الطويلة في كثير من الأحيان تكون أكبر بكثير من ضياع الاستطاعة الفعلية .

إن ضياع القدرة ΔA_i بالنسبة لنظام تشغيل ما يتحدد استناداً إلى استمراريته خلال الزمن t_i :

$$\Delta A_i = \Delta P_i \cdot t_i \quad \text{---(3-13)}$$

وبالتالي فإن مجموع ضياعات القدرة خلال فترة زمنية طويلة - مثلاً سنة - تتحدد استناداً إلى حاصل جمع ضياع القدرة من أجل أنظمة التشغيل المختلفة

$$\Delta A = \sum_{i=1}^{n} A_i = \sum_{i=1}^{n} \Delta P_i \cdot t_i \quad \text{---(3-14)}$$

حيث : n - عدد أنظمة التشغيل المدروسة .

* حساب شبكات النقل :

تكون ضياعات التوتر وضياعات الاستطاعة في شبكات النقل أكبر منها في شبكات التوزيع، وبالتالي فإن انخفاض التوتر عن قيمته الاسمية والاختلاف في الطور بين توترات النقاط المختلفة هو أكبر أيضاً لذلك في شبكات النقل تحدد تيارات الحمولات حسب قيمة التوتر الاسمي حتى وإن أطفأ كبيرة. وأيضاً من أجل شبكات النقل ذات التوتر (220 كيلوفولت) فما فوق يجب أن لا تهمل المركبة المرضية لهبوط التوتر من ذلك نستنتج أن طرق حسابات شبكات التوزيع لا تستعمل قطعاً في شبكات النقل من أجل الحسابات التقريبية.

نعطي عادة بالنسبة لشبكات النقل منبع التغذية والاستطاعات الظاهرة أو الاستطاعات الفعلية وعامل الاستطاعة ($\cos\varphi$) أو عامل الاستطاعة الردية ($\operatorname{tg}\varphi = \frac{Q}{P}$) للحمولات، لذلك لا بد من معرفة قيم الاستطاعات الظاهرة لمنابع التغذية والتي تتألف من مجموع استطاعات الحمولات إضافة إلى ضياع الاستطاعة في الشبكة (يفضل حساب الاستطاعة المتبارة من أعد نقطة في الشبكة).

في بداية الحساب تكون التوترات في نقاط الشبكة غير معروفة ومخطط الشبكة المطابقة غير خطي وبالتالي تتعقد حسابات الشبكة بشكل كبير، أما من أجل أجزاء من الشبكة غير كثيرة وذات التوتر (110 - 220 كيلوفولت) والتي تحسب سيراً تكون دقة النتائج بالنسبة لمعظم الحالات العملية كافية تماماً. بالنسبة لشبكات النقل المغلقة يتم حسابها (حساب الضياعات للاستطاعة) بشكل تقريبي باستعمال التوتر الاسمي وذلك يجعل استطاعة الحمولات وضياع الاستطاعة في الطريق من النهاية حتى البداية ويمثل كل الاستطاعة في بداية الخط الصادرة عن منبع التغذية، نطرح ضياعات التوتر من القيمة المعطاة للتوتر على قضبان التجميع للمنابع يحصل على قيمة التوتر في نقاط الشبكة كافة، وعيتها من أجل الشبكات ذات التوتر 110 / 150 كيلوفولت/ يمكن إهمال المركبة المرضية لهبوط التوتر.

* حساب شبكات النقل :

تكون صناعات التوتر وضياعات الاستطاعة في شبكات النقل أكبرها في شبكات التوزيع، وبالتالي فإن انحراف التوتر عن قيمته الاسمية والاختلاف في الطور بين توترات النقاط المختلفة هو أكبر أيضاً لذلك في شبكات النقل تحدد تيارات الحمولات حسب قيمة التوتر الاسمي حتى وفي إلى أحمال كبيرة. وأيضاً من أجل شبكات النقل ذات التوتر (220 كيلوفولت) فما فوق يجب أن لا نهمل المركبة المرضية لهبوط التوتر من ذلك نستنتج أن طرق حساب شبكات التوزيع تستعمل فقط في شبكات النقل من أجل الحسابات التقريبية.

نعطي عادة بالنسبة لشبكات النقل منبع التغذية والاستطاعات الظاهرة أو الاستطاعات الفعلية وعامل الاستطاعة ($\cos\varphi$) أو عامل الاستطاعة الردية ($\tg\varphi = \frac{Q}{P}$) للحمولات، لذلك لا بد من معرفة قيم الاستطاعات الظاهرة لمنابع التغذية والتي تتألف من مجموع استطاعات الحمولات إضافة إلى ضياع الاستطاعة في الشبكة (يفضل حساب الاستطاعة المتبارز من أبعد نقطة في الشبكة).

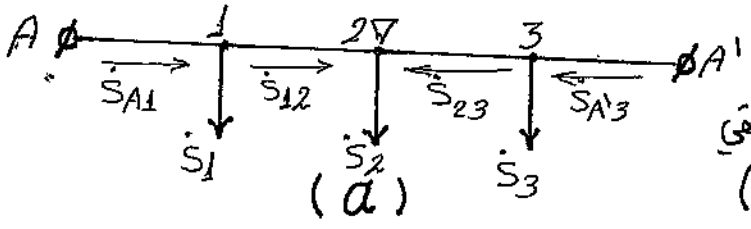
في بداية الحساب تكون التوترات في نقاط الشبكة غير معروفة ومخطط الشبكة المكافئة غير خطي وبالتالي تتعقد حسابات الشبكة بشكل كبير، أما من أجل أجزاء من الشبكة غير كبيرة وذات التوتر (110 - 220 كيلوفولت) والتي تحسب ميدانياً تكون دقة النتائج بالنسبة لمعظم الحالات العملية كافية تماماً. بالنسبة لشبكات النقل المغلقة يتم حسابها (حساب الضياعات للاستطاعة) بشكل تقريبي باستعمال التوتر الاسمي وذلك بجمع استطاعة الحمولات وضياع الاستطاعة في الطريق من النهاية حتى البداية وبذلك نحصل على الاستطاعة في بداية الخط الصادرة عن منبع التغذية، نطرح ضياعات التوتر من القيمة المعطاة للتوتر على قضبان التجميع للمنابع نحصل على قيمة التوتر في نقاط الشبكة كافة، نعيدها من أجل الشبكات ذات التوتر / 110 - 150 كيلوفولت/ يمكن إهمال المركبة المرضية لهبوط التوتر.

بالنسبة لشبكات النقل الحلقي أو بالنسبة للخطوط ذات التغذية من طرفين يتم إجراء الحساب التقريبي على مرحلتين، في المرحلة الأولى يتم حساب توزع التيارات أو الاستطاعات تماماً كما تم من أجل شبكات التوزيع، بدون أخذ مقاومات الاستطاعة بعين الاعتبار.
يتم حساب كل من جزئي الشبكة الرئيسية بالعلاقتين:

$$\left.\begin{aligned} \dot{S}_A &= \frac{\sum_{i=1}^{n} \dot{S}_i \dot{Z}_{Bi}}{\dot{Z}_{AB}} \\ \dot{S}_B &= \frac{\sum_{i=1}^{n} \dot{S}_i \dot{Z}_{Ai}}{\dot{Z}_{AB}} \end{aligned}\right\} \quad \text{---- (3-15)}$$

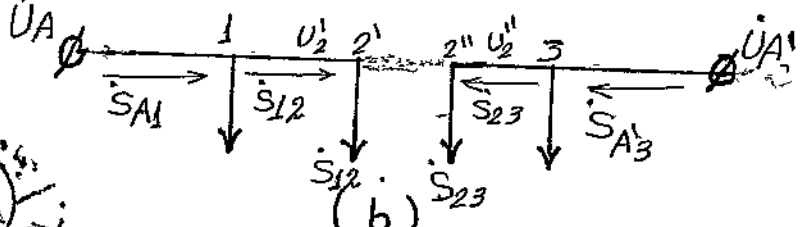
$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\sum_{i=1}^{n} \dot{I}_i \dot{Z}_{Bi}}{\dot{Z}_{AB}} \\ \dot{I}_B &= \frac{\sum_{i=1}^{n} \dot{I}_i \dot{Z}_{Ai}}{\dot{Z}_{AB}} \end{aligned}\right\} \quad \text{----(3-16)}$$

ثم نحسب توزع الاستطاعات في جميع أجزاء الشبكة ونقطة انقسام الاستطاعة المقابلة الشكل (3-3-a)، تقسم الحمولة في نقطة الانقسام (2) في الشكل (3-3-b) افتراضياً إلى قسمين:
$\dot{S}_2 = \dot{S}_{12} + \dot{S}_{23}$ وهذا الشكل تقسم الشبكة الحلقية كلها، أو الخط ذو التغذية من طرفين إلى قسمين مفتوحين الشكل (3-3-b).



(a)

شكل (3-3) حساب شبكات النقل الحلقي (خط ذو تغذية من طرفين)



(b)

يحسب كل من هذين القسمين وفقاً لما تقدم ذكره.

إن قيم التوترات في نقطة القسام الاستطاعة، التي يتم ايجادها عند حساب الخط A_2 هي (U'_2) وعند حساب الخط A'_2 هي (U''_2)، الشكل (3-3-ب) والتي يمكن أن تختلفا بالقيمة قليلاً عن بعضها البعض.

لتبسيط حساب شبكات النقل الحاصلة سيعمل كذلك ما يلي من طريقة (تقسيم الشبكة-م)، في هذه الحالة وشكل منفصل سيعرض توزع الاستطاعة الفعلية والردية من أجل الشبكات ذات التوتر الوحيد أو من أجل الشبكة-الوحيدة المتقولة إلى توتر أساسي واحد. هذه الطريقة تكون صالحة من أجل الشبكات المتجانسة والتي يتحقق من أجل كافة أجزائها النسبة الثابتة ($\xi = \frac{x}{r}$)

لندرس طريقة سير الخطوط وتطبيقها من أجل أبسط أشكال الشبكات المغلقة (الشبكة الحلقية)، التي مقاومة الجزء i هي ($\dot{Z}_i = R_i + j X_i$)، واستطاعة حمولته ($\dot{S}_i = P_i + j Q_i$)، وحسب قانون كيرشوف الثاني عند عدم وجود (ق.م.ك) في الفرع المدروس يمكننا الكتابة بالنسبة لشبكة ذات (n) جزء:

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{\dot{Z}_i \dot{S}_i}{U_N} = \sum_{i=1}^{n} \dot{Z}_i \dot{S}_i = 0 \quad \text{.....(3-17)}$$

نظراً لأن $U_N \neq 0$.

بتعويض قيمة Z_i و S_i في المعادلة (3-17) وتقسيم القيمة الناتجة إلى مركبتين حقيقية وتخيلية نحصل على المعادلتين التاليتين:

$$\sum_{i=1}^{n} (P_i R_i + Q_i X_i) = 0 \quad \text{---- (3-18)}$$

$$\sum_{i=1}^{n} (P_i X_i - Q_i R_i) = 0 \quad \text{---- (3-19)}$$

وبالنسبة للشبكة التي تحقق شروط التجانس تقريباً يمكننا كما ذكرنا أن نكتب ($X_i = \xi R_i$)، فبأخذ هذا الشرط بعين الاعتبار يمكننا كتابة المعادلة (3-18):

$$\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{1}{\xi} P_i X_i + \xi Q_i R_i \right) = 0 \qquad \text{---- (3-20)}$$

وبعد جمع (3-20) مع (3-19) المضروبة بـ (ξ) نحصل على :

$$\sum_{i=1}^{n} P_i X_i = 0 \qquad \text{---- (3-21)}$$

$$\sum_{i=1}^{n} Q_i R_i = 0 \qquad \text{---- (3-22)}$$

من ذلك سنستنتج أن دوافع المستطلعات الضريبية من الناحيتين الكمية والتقريبية أدنى تتوزع الاستطلاعات الفعلية للحوافز في فروع الدراسة وفقاً لمعاملاتها الرديئة ، أما الاستطلاعات الرديئة فتوزع وفقاً للمقاومات .

= . = . = . = . = . = .

* حساب شبكات النقل ذات الشكل المغلق :

في الجمل الكهربائية الحديثة قد يصل عدد العقد في شبكات النقل إلى المئات وعدد الحلقات المغلقة إلى عشرات العشرات، وكثيراً ما تصادف في الشبكات خطوطاً ذات توترات مختلفة، في هذه الحالة يعيد إلى نقل توتر جميع الشبكة إلى توتر وحيد، وعند تحليل أنظمة تشغيل الشبكات الكهربائية المغلقة فالاعتماد على الحاسبات، من المفيد استعمال ما يسمى « بطرق الحساب المباشرة » (المصفوفات) هذه الطريقة تعتمد على تطبيق مبادئ الجبر المباشر، عندها تشمل التصورات التحليلية للخطط، أو المخططات المرتبة للشبكة.

- حيث تثبت مسبقاً جميع العناصر المميزة للشبكة / الفروع، العقد المستقلة، الحلقات المغلقة المستقلة وترقم « تجتاز تسلسل الترقيم طوعياً » عندها من أجل كل حلقة مغلقة مستقلة يتم اختيار اتجاه موجب ما وتثبت على رسم من أجل كل حلقة مغلقة مستقلة يتم اختيار اتجاه موجب ما وتثبت على رسم هذه الاتجاهات الموجبة تؤخذ اشارات التيارات والقوى المحركة في كل فرع.

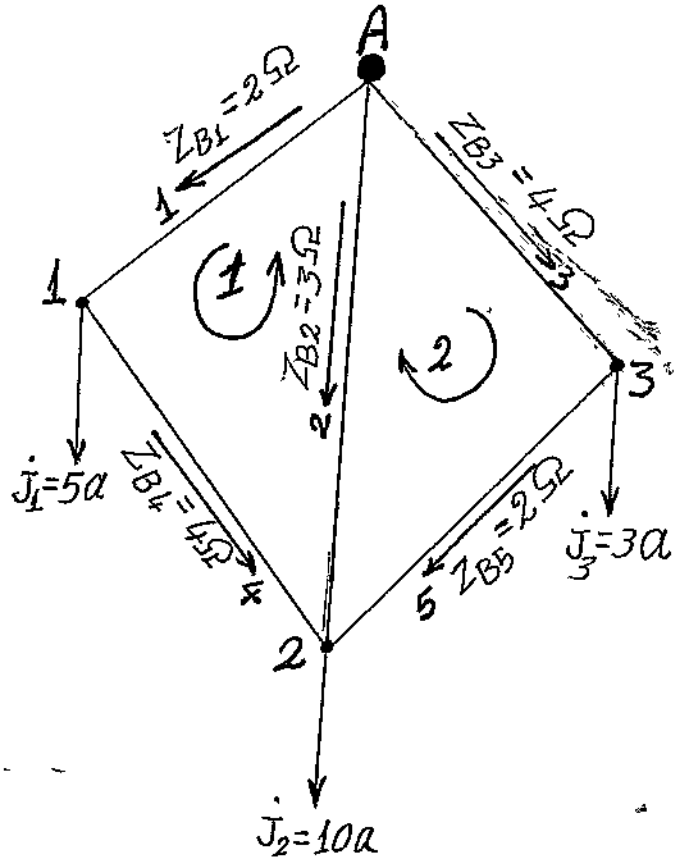
- إن عدد الحلقات المغلقة المستقلة في مخطط الشبكة المغلقة يجب أن يقابل العدد الأصغري لمعادلات الحلقات الضرورية لحساب تيارات الحلقات المجهولة، أما بالنسبة لباقي الحلقات المغلقة (حلقات غير مستقلة) يمكن الحصول عليها ببساطة جمع معادلات الحلقات المستقلة.

- عند التمثيل التحليلي لمخطط الشبكة يحرص على وضع كتابة محددة وواضحة للعلاقات الرئيسية بين مؤثرات نظام التشغيل. وفي الوقت ذاته يحصل على ترتيب معين يسهل إجراء الحساب بشكل آلي.

- يفترض أن نلتزم بمعين بشكل كاف بمبادئ الجبر المباشر، حيث أن استعمال الطرق المباشرة مناسب عملياً من أجل مخططات الشبكات المغلقة والمعقدة.

إلا أن الأمثلة التي سنوردها لاحقاً هي لاستعمال هذه الطرق من أجل أبسط الشبكات المغلقة ذات الحلقتين المغلقتين وذلك بغرض التوضيح (شكل 4-ت).

- نختار أحدى العقد كنقطة توازن (عادة تكون المنبع الأكثر) وتكون استطاعتها مجهولة أما توترها فهو معروف، هذه النقطة يجب أن تغطي جزءاً من حمولة الاستهلاك وكذلك ضياعات الاستطاعة التي لا تغطيها المنابع الأخرى، توضع نقطة التوازن عند عقدة الأسس حيث التوتر معروف، تختار ثوابت إحدى العقد عكس ثوابت العقد الأخرى، لذلك فإن عدد العقد المستقلة دائماً أقل من عدد العقد الكلي في الشبكة بواحد.



شكل (3-4)
مخطط الشبكة ذات الحلقتين

يتم تمثيل مخططات الشبكات الكهربائية تحليلياً بواسطة ما يلي:

- ماتريس الورود الأول (M) يبين ارتباط الفروع في عقد الدارة المستقلة، حيث يبلغ عدد أسطره عدد العقد المستقلة وعدد أعمدته يساوي عدد الفروع B.

العنصر M_{ij} يبين ارتباط العقدة (i) في الفرع (j) حيث يمكن أن تأخذ القيم التالية: +1 - عندما تكون العقدة i بداية الفرع j.
-1 - عندما تكون العقدة i نهاية الفرع j.
0 - عندما تكون العقدة i غير متصلة بالفرع j.

- ماتريس الورود الثاني (N) يمثل ارتباط الفروع بالحلقات المغلقة المستقلة للدارة، وهو ماتريس عدد سطوره يساوي عدد الحلقات المغلقة المستقلة "k"، وعدد أعمدته يساوي عدد الفروع B في الدارة، حيث أن العنصر N_{ij} يبين ارتباط الفرع j مع الحلقة i، وهو يأخذ القيم التالية:
+1 - إذا كان الفرع j يدخل في عداد الحلقة i ويتوافق معها بالاتجاه.
-1 - إذا كان الفرع j يدخل في عداد الحلقة i ويتعاكس معها بالاتجاه.
0 - إذا كان الفرع j لا يدخل في عداد الحلقة i.

وبهذا الشكل نستطيع أن نكتب ونمثل الماتريسين (M) و (N) كما يلي:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & \cdots & M_{1B} \\ M_{21} & M_{22} & \cdots & M_{2B} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ M_{y1} & M_{y2} & \cdots & M_{yB} \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad N = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & \cdots & N_{1B} \\ N_{21} & N_{22} & \cdots & N_{2B} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ N_{K1} & N_{K2} & \cdots & N_{KB} \end{bmatrix}$$

مثال (1): أوجد ماتريس الورود M وماتريس الورود N للدارة المبينة في الشكل (4-3):

الحل: من أجل الترقيم المبين واتجاهات الفروع والحلقات المغلقة في الشكل (4-3) وترقيم العقد نكتب:

$$M = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad N = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ & & & & \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

= . = . = . = . = . = . = . =

إن القوانين الأساسية لأية سلسلة كهربائية ذات عدد الفروع B ، والعقد N وعدد الحلقات المستقلة K تكتب بالشكل المائرسي كما يلي :

حسب قانون كيرشوف الأول :

$$M\dot{I} = \dot{J} \quad \text{-------} \quad (3-23)$$

حيث :- $\dot{I} = \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \vdots \\ \dot{I}_B \end{bmatrix}$ مائرسي عمود للتيارات في فروع الدارة ، عدد العناصر فيه B يساوي عدد الفروع في الدارة B ، ولتسهيل الكتابة نفرض أن التيارات في عمود تيارات الخطوط وهي تساوي B ضرورة بتيارات الأطوار .

$\dot{J} = \begin{bmatrix} \dot{J}_1 \\ \dot{J}_2 \\ \vdots \\ \dot{J}_N \end{bmatrix}$ - مائرسي عمود لتيارات المولدات في العقد (العقد المستقلة) للدارة وعدد عناصرها يساوي N .

وحسب قانون كيرشوف الثاني :

$$N\dot{U}_Z = \dot{E}_K \quad \text{-------} \quad (3-24)$$

حيث :- $\dot{E}_K = \begin{bmatrix} \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2 \\ \vdots \\ \dot{E}_K \end{bmatrix}$ مائرسي عمود للقوى المركبة في الحلقات وعدد عناصرها يساوي K .

$\dot{U}_Z = \begin{bmatrix} \dot{U}_{Z1} \\ \dot{U}_{Z2} \\ \vdots \\ \dot{U}_{ZB} \end{bmatrix}$ - مائرسي عمود لهبوطات التوتر في ممانعات فروع الدارة ، وعدد عناصره يساوي B .

وحسب قانون أوم الرئيسي :

$$\dot{U}_Z = Z_B\dot{I} - \dot{E} \quad \text{------} \quad (3-25)$$

حيث :- $\dot{E}$ - مائرسي عمود للقوى المركبة في فروع الدارة ،
Z_B - مائرسي ممانعات فروع الدارة .

عادة، عندما يُنظم التشغيل المتناظرة تكون المانعيات $\dot{Z}_B$ قطرياً.
حيث تكون كل العناصر الواقعة على القطر الرئيسي الصفر (للسهولة سوف لا نكتب)،
نظراً لعدم وجود مماثلات العرض المتبادل بين مركز الدارة المختلفة.
أي يمكننا أن نكتب:

$$\dot{Z}_B = \begin{bmatrix} \dot{Z}_1 & & \\ & \dot{Z}_2 & \\ & & \dot{Z}_B \end{bmatrix}$$

وبالتالي فإن معادلات الحالة الأساسية للدارة المطابقة للشبكة الكهربائية هي في العقد:

$$\dot{J} = \dot{U}_\Delta \dot{Y} \quad \text{---- (3-26)}$$

حيث:

$\dot{U}_\Delta = \begin{bmatrix} \dot{U}_{\Delta 1} \\ \dot{U}_{\Delta 2} \\ \vdots \\ \dot{U}_{\Delta y} \end{bmatrix}$ ماتريس عمود طبوط التوتر من عقدة الأساس من عقد الدارة لها، وعدد عناصر الماتريس يساوي عدد عقد الدارة لا.

$\dot{Y} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dot{Y}_{12} & \cdots & \dot{Y}_{1y} \\ \dot{Y}_{21} & \dot{Y}_{22} & \cdots & \dot{Y}_{2y} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \dot{Y}_{y1} & \dot{Y}_{y2} & \cdots & \dot{Y}_{yy} \end{bmatrix}$ ماتريس ناقليات العقد وعددها لعدد العقد لا.

يوضع على القطر الرئيسي للماتريس $\dot{Y}$ القيم التي تمثل مجموع ناقليات جميع الفروع المرتبطة مع عقدة الدارة والمقابلة للأرقام الدليلية لعناصر الماتريس. فعند تقاطع السطر (i) والعمود (i) توضع ناقلية الفرع مأخوذة بإشارة سالبة المرتبطة بين العقدتين (i) و (k) للدارة.

إن الماتريس $\dot{U}_\Delta$ من أجل الدارة بدون فروع عرضانية مرتبط مع ماتريس توترات العقد $\dot{U}$ كما يلي:

$$\dot{U}_\Delta = \dot{U} - \dot{U}_B \quad \text{---- (3-27)}$$

جامعة جيهان الخاصة التعليمية

حيث : - $\dot{U} = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \dot{U}_y \end{bmatrix}$ ماتريس عمود لتوترات العقد ، عدد عناصره يساوي عدد العقد في الدارة .

- $\dot{U}_B$ توتر عقدة الأساس .

إن معادلة الحلقات من أجل الدارة التي لا تحتوي على منبعات في العقد :

$$\dot{Z}_k \cdot \dot{I}_k = \dot{E}_k \quad \text{-----(3-28)}$$

حيث : - $\dot{I}_k = \begin{bmatrix} \dot{I}_{k1} \\ \dot{I}_{k2} \\ \vdots \\ \dot{I}_{kn} \end{bmatrix}$ ماتريس عمود لتيارات الحلقات ، عدد عناصره يساوي عدد الحلقات k .

- Z_k ماتريس من الرتبة k لممانعات الحلقات ، على قطره الرئيسي توضع الممانعات الذاتية للحلقات وعند تقاطع السطر (i) مع العمود (j) توضع ممانعات الفروع المشتركة بين الحلقتين (i) و (j) .

بالنسبة للدارات الخطية معادلات الحالة يمكن أن تحل مباشرة من المعادلة (3-27) بحيث نحصل على المعادلة :

$$\dot{U}_\Delta = \dot{Y}^{-1} \dot{J} = \dot{Z} \dot{J} \quad \text{.... (3-29)}$$

وبالتالي المعادلة (3-28) منها نحصل على :

$$\dot{I}_k = \dot{Z}_k^{-1} \dot{E}_k = \dot{Y}_k \dot{E}_k \quad \text{--(3-30)}$$

لتحديد ماتريات $\dot{U}_\Delta$ يمكن إيجاد ماتريس التيارات $\dot{I}$ في الفروع باستخدام قانون أوم (المعادلة 3-25) وكذلك المعادلة :

$$M_t \dot{U}_\Delta = \dot{U}_B \quad \text{--- (3-31)}$$

حيث : M_t - منقول ماتريس البورود M .

إن العلاقة (3-31) تنتج من تعريف ماتريس الورود الأول M .
حل عمود حليلي من الماتريس M يسمح بإيجاد توترات العقد من الماتريس
ΔU من أجل رأس البداية ورأس النهاية للفرع الذي حليلي ز وهذه
تنتج بإرسالات متقاكسة ومجموعها الجبري - هذا الشكل - يحدد هبوط
التوتر U_B على الفرع ز .

بتعويض العلاقة (3-31) في العلاقة (3-25) نحصل على :

$$\dot{Z}_B \dot{I} = M_t \dot{U}_\Delta + \dot{E} \quad \text{----- (3-32)}$$

ومنه نحصل على ماتريس التيارات في الفروع في الحالة العامة ⇐

$$\dot{I} = \dot{Z}_B^{-1} \cdot \left(M_t \dot{U}_\Delta + \dot{E} \right) \quad \text{---(3-33)}$$

وإذا لم تكن لدينا قوى محركة في الفروع ⇐

$$\dot{I} = \dot{Z}_B^{-1} M_t \dot{U}_\Delta \quad \text{--- (3-34)}$$

وبنفس الطريقة وبعد تحديد ماتريس تيارات الحلقات $\dot{I}_k$ بواسطة
حل المعادلة (3-30) ، يمكن إيجاد ماتريس التيارات في الفروع $\dot{I}$ ،
وهذا الغرض لابد من ضرب الماتريس المنقول N_t (منقول ماتريس الورود N)
بضربه بماتريس تيارات الحلقات $\dot{I}_k$ ⇐

$$\dot{I} = N_t \cdot \dot{I}_k \quad \text{-----(3-35)}$$

يمكننا بعد ذلك إيجاد ماتريسات التوترات في العقد U وبقية ثوابت
نظام التشغيل
وبالتالي تعين الخطية ، وتكون الحلول معطاة باستطاعاتها تام الحل
مستقيم ، وبذلك نضطر إلى استعمال طرق التقريب المتتالي .
أو نعمد إلى تقريب الدارة غير الخطية إلى دارة مكافئة خطية

وفيما يلي وبغرض التوضيح نبين استعمال معادلة الحلقات، عند ذلك نقسم الحل بشكل عام وكذلك نعطي الحل المناسب من أجل الحالات التقريبية (المرحلة الأولى) نيدوياً، حيث يمكن استعماله من أجل الحالات غير المعقدة للدارات غير الخطية ذات التوترات (220 - 110 كيلوفولت).

عند تحديد تواتر النظام التشغيل في معظم الحالات من المناسب استعمال تقسيم دارة الشبكة المغلقة إلى سجرة وأعضاء.

تدعى "سجرة الدارة" ذلك الجزء المفتوح منها الذي يصل عقدة الأساس مع جميع العقد المستقلة. أما الأعضاء فهي بقية فروع الدارة المغلقة.

إن إضافة كل من الأعضاء إلى سجرة الدارة يؤدي إلى إنشاء حلقة مستقلة مغلقة.

وحسب تقسيم الدارة إلى سجرة وأعضاء نقسم كذلك مصفوفات الورود إلى تركيبات أو أجزاء.

$$M = |M_\alpha M_\beta| \quad \text{و} \quad N = |N_\alpha N_\beta|$$

حيث يشير الدليل (α) إلى الفروع الداخلة بتركيب سجرة الدارة، والدليل (β) يشير إلى الفرع الذي يشكل عضواً.

في سجرة الدارة يكون عدد الفروع مساوياً لعدد العقد المستقلة، وعدد الأعضاء يساوي عدد الحلقات المستقلة، لذلك فإن مصفوفتي (M_α) و(M_β) مربعتان. وهذا يعني أنه بالنسبة لها يمكن تحديد المصفوفات العكسية مما يسهل في بعض الحالات الخاصة تبسيطاً للحل.

* استعمال معادلة الحلقات من أجل الدارات الخطية :

في دارات السيطرات المغلقة المعقدة يكون عدد الحلقات المغلقة المستقلة أقل بـ 5 - 7 مرات من عدد العقد، ولذلك تكون مرتبة الماتريس ($\dot{Z}_K$) - (الخاص بمعاقات الحلقات) - أقل بكثير من مرتبة الماتريس ($\dot{Y}$) - (الخاص بمعاقات أو ناقليات العقد والفروع) - مما يقلل إلى درجة كبيرة الأعمال الحسابية عند تحويل الماتريس.

من أجل الدارات ذات المولات المحددة على سطل تيارات المولة فإنه ماتريس التيارات في الفروع يمكن أن يمثل على سطل مركبتين :

$$\dot{I} = \dot{I}' + \dot{I}''$$

حيث: $\dot{I}'$ - تحقق الشرط ($M\dot{I}' = \dot{J}$) والمركبة الثانية،

$\dot{I}''$ - تحقق الشرط ($\dot{I}'' = N_i \dot{I}_K$) .

ومن وجهة نظر سهولة الحساب يمكن افتراض أن التيارات ($\dot{I}'_\beta$) في أعضاء الدارة تساوي الصفر أي أنه :

$$\dot{I}' = \begin{bmatrix} \dot{I}'_\alpha \\ \dot{I}'_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}'_N \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{----(3-36)}$$

حيث: - $\dot{I}'_\alpha = C_0 \dot{J}$ ، هنا : $C_0 = M_\alpha^{-1}$ ماتريس ثوابت التوزيع لفروع سطل الشجرة من أجل الأعضاء المفتوحة.

يمكن تحديد الماتريس (C_0) مباشرة من سطل الدارة، حيث الأسطر تقابل فروع سجرة الدارة، والأعمدة تقابل العقد في الدارة، فعند تقاطع العمود ن والسطر i نضع :

+1 - إذا كان تيار المولة في العقدة i يسير إلى عقدة التوازن في الفرع i، واتجاه التيار يتوافق مع اتجاه الفرع i،

-1 - إذا كان تيار المولة في العقدة i يسير إلى عقدة التوازن في الفرع i، واتجاه التيار لا يتوافق مع اتجاه الفرع i،

0 - إذا كان تيار المولة لا يسير في الفرع المذكور.

نقسم ماتريس ثوابت التوزيع (C) للدارة ككل، إلى مقابلة للشجرة (C_α) والأعضاء (C_β) :

$$C = \begin{bmatrix} C_\alpha \\ C_\beta \end{bmatrix}$$

عند عدم وجود تيارات في الأعضاء ($\dot{I}'_\beta = 0$) تتولد هبوطات في الوتر غير متوازنة في حلقات الشطل المستقلة، وهذه يجب موازنتها بواسطة تيارات الحلقات "$\dot{I}$"، بأخذ ذلك بعين الاعتبار فإن مصفوفة التيارات $\dot{I}$ في الفروع ستكون:

$$\dot{I} = \dot{I}' + \dot{I}'' = C'_0 J + N_t \dot{Z}_K^{-1} \dot{E}_K$$

حيث: $C'_0 = \begin{bmatrix} C_0 \\ 0 \end{bmatrix}$ تقابل المصفوفة C_0 بعد إضافة مصفوفة الصفر الذي يأخذ وجود الأعضاء بعين الاعتبار.

يمكن تحديد مصفوفة القوى المحركة الكهربائية الحلقية وفقاً لقانون أوم وقانون كيرشوف الثاني من العلاقتين (3-24) و (3-25)، وبالتالي نحصل عند عدم وجود قوى محركة كهربائية في الفروع على:

$$\dot{E}'_K = -N\dot{U}_Z = -N\dot{Z}_B \dot{I}' \quad \text{---- (3-37)}$$

وبالتالي مصفوفة القوى المحركة الحلقية الناتج عن مرور تيارات الحولة في فروع الشرحة يأخذ الشكل التالي:

$$\dot{E}''_K = -N_\alpha \dot{Z}_\alpha \dot{I}_\alpha = -N_\alpha \dot{Z}_\alpha C_0 J \quad \text{---(3-38)}$$

حيث: $\dot{Z}_\alpha$ - جزء من مصفوفة ممانعات الفرع $\dot{Z}_B$ المقابل لشرحة الدارة. بالاعتماد على طريقة التقريب (الحساب المتتالي) أن مصفوفة ممانعات الحلقات $\tilde{Z}_K$ تعتبر قطرياً (أي أن جميع عناصرها ماعدا القطر الرئيسي تساوي الصفر). وبالتالي من السهولة بمكان إيجاد المصفوفة العكسية $\tilde{Y}_K = \tilde{Z}_K^{-1}$، ومن أجل الشروط المعتبرة فإن مصفوفة التيارات الحلقية تتألف من مركبتين (حدين):

$$\dot{I}''_K = \tilde{Y}_K \dot{E}_K + (1 - \tilde{Y}_K \dot{Z}_K) \dot{I}'_K \quad \text{---(3-39)}$$

حيث يشير: إلى مصفوفة التيارات الحلقية عند الحولة التي يمكن أخذها من الحساب المتتالي (أو الدليل (1)) إلى الحولة التالية، كما أن الحد الأول من العضو الأيمن من العلاقة السابقة يمثل العلاقة التقريبية والحد الثاني سيمثل تصحيحاً مقترحاً، حيث يتوقف الحساب عندما تصبح الفروق بين التيارين $\dot{I}_K$ و $\dot{I}''_K$ أصغر من قيمة محددة معطاة سلفاً

* تحليل الأعطال في الجمل الكهربائية :

إن أهم المسائل في دراسة الجمل الكهربائية هي تعيين التيارات والجهود الناتجة في الشبكة عند شروط العطل ، نظراً لأن المعرفة الدقيقة لتيارات الدارة القصيرة هي التي تسمح لمهندس الشبكات بتحديد عيارات القواطع الآلية وأجهزة الحماية الضرورية لعزل الأجزاء المعطلة ، إضافة إلى التداخلات مع دارات الاتصالات الكهربائية والاجهادات الميكانيكية والحرارية في الخطات وفي التجهيزات الموصلة إلى الجملة . هي أيضاً تتقرر بالمعرفة الدقيقة لتيار العطل في الجمل وجهوده أيضاً .

في الجمل الكهربائية ثلاثية الأطوار قد تكون الأعطال متناظرة (تشمل الأطوار الثلاثة معاً) أو غير متناظرة ، إن حل الأعطال المتناظرة سهل نسبياً نظراً لشبهها بالتحميل المتناظر لجملة ثلاثية الأطوار إلا أن أكثر الأعطال هي التي تحدث في الجمل ثلاثية الطور وتكون غير متناظرة بطبيعتها (مثل العازلية بين أحد الأطوار والأرض ، مثل العازلية بين طورين بوجود الأرض أو بدونها ... الخ) .

إن هذه الأعطال لا تؤدي فقط إلى اضطراب غير طبيعي في الجهد والتيار بالقيمة وبزاوية الطور النسبية ، إلى حدوث سقاطي الجهد والتيار بالقيمة وبزاوية الطور النسبية .

- المركبات المتناظرة (Symmetrical components) :

هذه النظرية اقترحها العالم فورتسكيو في بداية القرن العشرين لتبسيط حل وحساب الشبكات الكهربائية ثلاثية الأطوار غير المتناظرة .

افترض أنه يمكن تحليل الكميات الأصلية غير المتناظرة إلى كميات متوازنة ست يمكن البرهان على أن هذا التحليل ممكن من أجل المقادير في الحالة الدائمة وكذلك من أجل القيم الآنية (اللحظية) كما أنه وجد عند إعادة تجميع الكميات المتوازنة يمكننا الحصول على الجملة كما كانت من جديد أي أن نظرية التناظر عن الكميات المتوازنة ممكن أن تكون خطية .

لتكن V_a ، V_b ، V_c الجهود الطورية لجملة ثلاثية الأطوار غير متوازنة والجهود V_{a1} ، V_{a2} ، V_{a0} هي جهود الجملة الفرعية بحيث :

$$\left.\begin{aligned} V_a &= C_{11} V_{a1} + C_{12} V_{a2} + C_{10} V_{a0} \\ V_b &= C_{21} V_{a1} + C_{22} V_{a2} + C_{20} V_{a0} \\ I_{bc} &= C_{31} V_{a1} + C_{32} V_{a2} + C_{30} V_{a0} \end{aligned}\right\} \quad (5-1)$$

علماً أن الثوابت C_{11} ، C_{12} ، ... اختيارية على أن تكون مقلوبتها الاتجاهي الصفري :

جامعة حماة

$$\Delta = \begin{vmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{10} \\ C_{21} & C_{22} & C_{20} \\ C_{31} & C_{32} & C_{30} \end{vmatrix} \neq 0 \quad \text{---(5-2)}$$

أي أن أشعة الجهود الأصلية انطلقت إلى (9) مركبات للجهد ($C_{12}Va_2, C_{11}Va_1$ ----) وعوضاً عن (9) مركبات مستقلة - فكّر فورتسكيو ثلاث جمل متوازنة كما يلي :

الجملة الأولى $C_{11}Va_1$ ، $C_{21}Va_1$ ، $C_{31}Va_1$

الجملة الثانية $C_{12}Va_2$ ، $C_{22}Va_2$ ، $C_{32}Va_2$

الجملة الثالثة $C_{10}Va_0$ ، $C_{20}Va_0$ ، $C_{30}Va_0$

بمقارنة الجمل الثلاثة المتوازنة مع الجمل الثلاثية الأطوار المتوازنة ، فقد ظهرت الجملة الأولى المتوازنة مماثلة للجمل ثلاثية الأطوار المتوازنة ، أي أنه لو طبقنا الجملة الأولى على محرك تحريضي ثلاثي الأطوار فسوف يدور بالاتجاه الموجب أي بعكس عقارب الساعة ، وهكذا فقد أصبحت الجملة الأولى المقترحة تأخذ الشكل الترتيبي الشعاعي التالي :

$$Va_1 \quad , \quad Va_1 \angle -120^\circ \quad , \quad Va_1 \angle -240^\circ$$

وبطريقة مماثلة أعطى فورتسكيو قيماً معينة أخرى للثوابت C_{12} ، C_{22} ، C_{32} بحيث أن الجهود الناتجة تصبح مماثلة للجهود التي إذا طبقت على قطبي محرك تحريضي فإنها تغير اتجاه دورانه ، وبالتالي الجملة الثانية اتخذت الشكل :

$$Va_2 \quad , \quad Va_2 \angle -240^\circ \quad , \quad Va_2 \angle -120^\circ$$

وانطلاقاً من شرط كون المعينة لا تساوي الصفر فقد أعطيت الثوابت

C_{10} ، C_{20} ، C_{30} قيمة تساوي الواحد .

وهكذا ، عوضاً عن مجموعة التيارات غير المتوازنة I_a ، I_b ، I_c أو مجموعة الجهود غير المتوازنة Va ، V_b ، V_c ، فإننا نحصل على ثلاث مجموعات من التيارات أو الجهود المتوازنة وهي تعرف بـ «تيارات وجهود التسلسل الموجب والتسلسل السالب والتسلسل الصفري.

إن تيارات أرمهود التسلسل الموجب (المباشر) هي :

I_{a1} ، I_{b1} ، I_{c1} ، V_{a1} ، V_{b1} ، V_{c1}

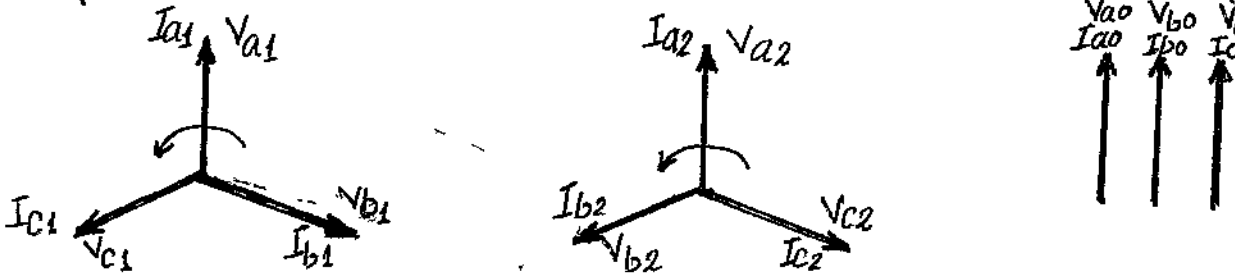
وتيارات أرمهود التسلسل السالب (العكسي) هي :

I_{a2} ، I_{b2} ، I_{c2} ، V_{a2} ، V_{b2} ، V_{c2}

كما أن تيارات أرمهود التسلسل الصفري تصبح كما يلي :

I_{ao} ، I_{bo} ، I_{co} ، V_{ao} ، V_{bo} ، V_{co}

وترتيب الأطوار للحالات الثلاث يبينها الشكل (5-1) .



a) b) c)

شكل (5-1)

تسلسل الأطوار (c - b - a)

a) تسلسل موجب (مباشر)

b) تسلسل سالب (عكسي)

c) تسلسل صفري (متماثل)

وهكذا فإن العلاقات المعطاة بالمعادلة (5-1) تأخذ الشكل :

$$\left.\begin{aligned} I_a &= I_{ao} + I_{a1} + I_{a2} \\ I_b &= I_{bo} + I_{b1} + I_{b2} \\ I_c &= I_{co} + I_{c1} + I_{c2} \end{aligned}\right\} \quad \text{و أيضاً} \quad \left.\begin{aligned} V_a &= V_{ao} + V_{a1} + V_{a2} \\ V_b &= V_{bo} + V_{b1} + V_{b2} \\ V_c &= V_{co} + V_{c1} + V_{c2} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (5-3)$$

وبالتالي فإن شعاعياً تكون مرتبطة مع بعضها البعض بالعلاقات التالية :

$$\dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a1}\angle 0^\circ \;;\; \dot{I}_{b1} = \dot{I}_{a1}\angle 240^\circ \;;\; \dot{I}_{c1} = \dot{I}_{a1}\angle 120^\circ$$
$$\dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a2}\angle 0^\circ \;;\; \dot{I}_{b2} = \dot{I}_{a2}\angle 120^\circ \;;\; \dot{I}_{c2} = \dot{I}_{a2}\angle 240^\circ$$
$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a0}\angle 0^\circ \;;\; \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{a0}\angle 0^\circ \;;\; \dot{I}_{c0} = \dot{I}_{a0}\angle 0^\circ \quad \text{---(5-4)}$$

وقد اقترح العالم ذاته عامل جديد هو عامل المركبات المتناظرة وهو شبيه بالعامل (j)

لحيث يكون: أي أن العامل (a) عبارة عن شعاع مركب طوله واحدة وزاويته طوله بالنسبة لمحور الأعداد الحقيقية (120°).

$$a = 1\angle 120^\circ = 1e^{j2\pi/3} = \cos 120^\circ + j\sin 120^\circ = -0{,}5 + j\,0{,}866$$
$$a^2 = 1\angle 240^\circ = \cos 240^\circ + j\sin 240^\circ = -0{,}5 - j\,0{,}866$$
$$a^3 = 1\angle 360^\circ = \cos 360^\circ + j\sin 360^\circ = 1 - j0 \quad \Rightarrow$$

أي أن العامل a لو ضرب بأي شعاع يسبب له حدوث إزاحة مقدارها 120° عكس عقارب الساعة ودوران الشعاع الذي طوله 1 أما ضرب الشعاع بـ a^2 فيسبب دوران الشعاع بـ 240° أيضاً عكس عقارب الساعة

$$1 + a + a^2 = 0 \quad \text{---- (5-5)}$$

وإذا استعملنا عامل المركبات المتناظرة المذكور أعلاه فإن مركبات السلسلات الثلاثة تصبح:

(تسلسل مباشر) V_{a1} و a^2V_{a1} و aV_{a1} ؛ I_{a1} و a^2I_{a1} و aI_{a1}

(تسلسل عكسي) V_{a2} و aV_{a2} و a^2V_{a2} ؛ I_{a2} و aI_{a2} و a^2I_{a2}

(تسلسل صفري) V_{a0} و V_{a0} و V_{a0} ؛ I_{a0} و I_{a0} و I_{a0}

وبالتالي نحصل من أجل الجهود والتيارات للاقات التالية:

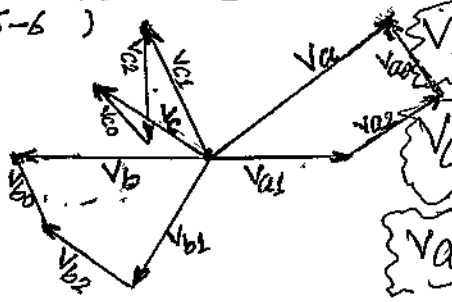
$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \qquad V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}$$
$$I_b = I_{a0} + a^2I_{a1} + aI_{a2} \quad \text{أو} \quad V_b = V_{a0} + a^2V_{a1} + aV_{a2} \quad \text{--- (5-6)}$$
$$I_c = I_{a0} + aI_{a1} + a^2I_{a2} \qquad V_c = V_{a0} + aV_{a1} + a^2V_{a2}$$

بمعرفة V_a و V_b و V_c أو I_a و I_b و I_c فإنه يمكن حساب المركبات المتناظرة كما يلي:

$$I_a + I_b + I_c = 3I_{a0} + (1 + a^2 + a)I_{a1} + (1 + a + a^2)I_{a2}$$
$$= 3I_{a0} \Rightarrow \boxed{I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c)}$$
$$\boxed{I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c)}$$
$$\boxed{I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c)} \quad \text{---(5-7)}$$

وبالطريقة نفسها نجد:

هذا المخطط السداسي يمثل المعادلة (5-6)



وبالنسبة للجهود نجد:

$$\left.\begin{aligned} V_{a0} &= \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \\ V_{a1} &= \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \\ V_{a2} &= \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \end{aligned}\right\} \quad \text{---(5-8)}$$

- وبالتالي فإنه وبواسطة المعادلات (5-6)، (5-7) و (5-8) يمكن وبسهولة معالجة أي عطل غير متناظر، وبالتالي فإن التحليل يصبح في متناول اليد.

* **الاستطاعة بدلالة المركبات المتناظرة:**

بما أن المركبات المتناظرة للمجلة متناظرة بالنسبة للشبكات ثلاثية الأطوار، أي يمكن تمثيل أثر كل مركبة بأخذ الطور A كمرجع وبالتالي شروط الدارة الفعلية الناجمة عن تطبيق التيارات غير المتناظرة (I_c ، I_b ، I_A) يمكن تمثيلها بدقة بواسطة وصل شبكات أحادية الطور حيث يؤثر في كل شبكة تيار أحد التسلسلات فقط (I_{a2} ، I_{a1} ، I_{a0}).

إضافة إلى أن الشبكات ذات التسلسل الموجب والعكسي مماثلة للدارات أحادية الطور والتي تمثل عمل ثلاثة الأطوار متناظرة، أما الشبكة ذات التسلسل الصفري فهي عبارة عن شبكة أحادية الطور تجتازها تيارات التسلسل الصفري الثلاثة.

إن طريقة التحليل التي تعتمد أساس حسابات الدارات القصيرة غير المتناظرة تشمل الاعتبارات التالية:

أ- يستعاض عن التيارات غير المتناظرة الناجمة عن العطل غير المتناظر بثلاث عمل من التيارات أو الجهود المتوازنة.

ب- بما أن التسلسلات مستقلة عن بعضها، فإن تيارات التسلسل الواحد مستقلة بمتابعة الشبكة لذلك التسلسل وحده.

ج- إن الآلات المتواجدة ثلاثية الأطوار هي المنابع الوحيدة للتوتر في المجلة الكهربائية وشبكات التسلسل الموجب هي الوحيدة التي تحتوي على منابع للجهد.

إذا كانت المركبات المتناظرة للتيار والتوتر معلومة، يمكن حساب الاستطاعة المستهلكة في دارة ثلاثية الطور من تلك المركبات.

إن الاستطاعة المعقدة الاجمالية التي تسري في دارة ثلاثية الخطوط a، b، c هي:

$$S = P + jQ = V_a I_a^* + V_b I_b^* + I_c^* \quad \text{--- (5-9)}$$

حيث تمثل V_a ، V_b ، V_c التوترات في الطور عند النهايات، وتمثل I_a ، I_b ، I_c التيارات التي تسري إلى الدارة من الخطوط الثلاثة، والاتصال التيازي قد يوجد أو لا يوجد، أما I_a^* ، I_b^* ، I_c^* فهي مرافقات التيارات المعقدة I_a ، I_b ، I_c.

ولكن وحسب العلاقة (5-6) وبالتالي :

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}$$
$$V_b = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2}$$
$$V_c = V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2}$$

و

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2}$$
$$I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2}$$
$$I_c = I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} I_{a0}^* = I_{a0}^* + I_{a1}^* + I_{a2}^* \\ I_b^* = I_{a0}^* + a^2 I_{a1}^* + a I_{a2}^* \\ I_c^* = I_{a0}^* + a I_{a1}^* + a^2 I_{a2}^* \end{cases}$$

بالتعويض في العلاقة (5-9) وإجراء عمليات الجبر بين قيم التيارات المرافقة وقيم التوترات المذكورة أعلاه، وعلم بأن $1+a+a^2=0$ نلاحظ أن العلاقة (5-9) تأخذ الشكل التالي بدلالة المركبات المتناظرة :

$$S = P + jQ = 3\left(V_{a0} I_{a0}^* + V_{a1} I_{a1}^* + V_{a2} I_{a2}^*\right) \quad \text{----(5-10)}$$

والمعادلة الأخيرة مماثلة لحالة التناظر عندما تكون التيارات والجهود هي بالسيمة للأطوار .

* دراسة مولدات التيار المتناوب عند الحمل غير المتناظر :

كنا قد ذكرنا بأن المولدات المتواقتة ، تعتبر المنبع الرئيسي للطاقة الكهربائية ، تتعرض هذه المولدات أثناء عملها لأنواع مختلفة من التحميل (بعضها يلائمه مناسباً وكثير منها غير مقبول وخاصة عند الأعطال) ولتحليل تصرف هذه المولدات عند شروط العطل سنعمد إلى افتراض الآتي :

١- المولدات المتواقتة هي آلات ثلاثية الأطوار موصلة بشكل نجمي .

٢- تنتج هذه المولدات قوة محركة كهربائية ثلاثية الأطوار متوازنة وذات تسلسل موجب فقط .

٣- النقطة الحيادية إما مؤرضة مباشرة أو عبر أوميم مقاومة .

٤- المولدات غير محملة لحظة وقوع العطل . وفي حال وجود حمل في اللحظة التي تسبق العطل ، فإن أثر العطل يمكن اعتباره باستعمال نظرية التعضيد .

انطلاقاً من الافتراضات السابقة سندرس أربعة أنواع من الأعطال :

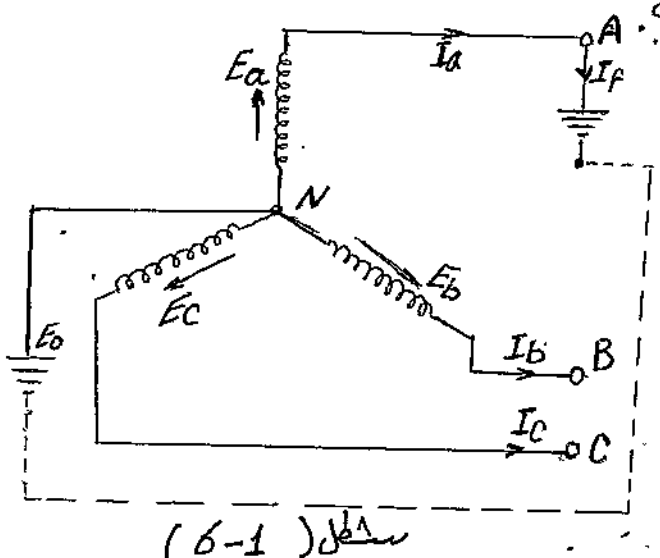
آ- عطل أحادي بين خط والأرض .

ب- عطل بين خطين .

جـ- عطل بين خطين مع الأرض .

د- عطل ثلاثي الخطوط مع الأرض مباشرة أو بدون الاعتماد على أوميم .

آ- عطل خط مع الأرض :



شكل (1-6)

لتكن لدينا : (القوى الدافعة المولدة)

E_a ، E_b ، E_c الجهود الطورية المولدة .

V_a ، V_b ، V_c الجهود الطورية بين أقطاب المولد .

I_a ، I_b ، I_c التيارات في الأطوار .

وكما افترضنا ، ينتج المولد دائماً جملة التسلسل الموجب أي أن :

$$E_a = E_g \; ; \; E_b = a^2 E_a = a^2 E_g \; ; \; E_c = a E_a = a E_g$$

وعليه فإن حدوث العطل (قصر الطور A مع الأرض) هو الذي سيؤدي إلى ظهور المركبات المتناظرة والاعتماد على المعادلات (5-7) و (5-8) نكتب :

$$E_{a0} = \frac{1}{3}(E_a + E_b + E_c) = \frac{1}{3}(1 + a^2 + a)\, E_g = 0$$

$$E_{a1} = \frac{1}{3}(E_a + aE_b + a^2 E_c) = \frac{1}{3}(1+1+1)\, E_g = E_g$$

$$E_{a2} = \frac{1}{3}(E_a + a^2 E_b + aE_c) = \frac{1}{3}(1 + a^2 + a^2)\, E_g = 0$$

جامعة حماة

ثم نكتب القيم المقابلة للجهود بين قطبي المولد :

$$\left.\begin{aligned} V_{a_1} &= E_g - I_{a_1} Z_{g_1} \\ V_{a_2} &= 0 - I_{a_2} Z_{g_2} \\ V_{a_0} &= 0 - I_{a_0} Z_{g_0} \end{aligned}\right\} \quad ----(6-1)$$

من الشكل (1-6) نجد :

$$I_b = 0 \ , \ I_c = 0 \ , \ V_n = 0 \quad ---(6-2)$$

من العلاقة (6-2) والعلاقة (5-7) والمركبات المتناظرة نحصل على معادلات الجهود والتيارات التالية :

$$\left.\begin{aligned} I_{a1} &= \tfrac{1}{3}(I_a + a I_b + a^2 I_c) = \tfrac{1}{3} I_a \\ I_{a2} &= \tfrac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c) = \tfrac{1}{3} I_a \\ I_{a0} &= \tfrac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = \tfrac{1}{3} I_a \end{aligned}\right\} \Rightarrow$$

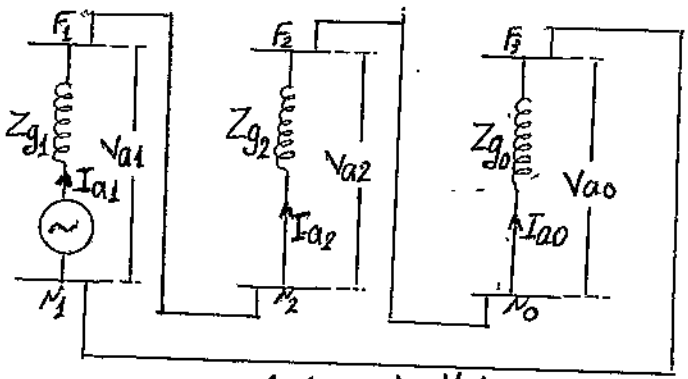
$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \tfrac{1}{3} I_a \quad ----(6-3)$$

كذلك :

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = 0 \Rightarrow$$

$$V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} = 0 \quad ---(6-4)$$

من المعادلات المشتقة من العلاقة (6-1) يمكننا أن نحصل على الشبكة المقابلة لكل تسلسل من أجل التوافقيات الثلاث كما هو مبين في الشكل (6-2) .



شكل (6-2) الشبكة المقابلة لكل تسلسل من أجل التوافقيات الثلاث

وتحدد المعادلتان (6-3) و (6-4) طريقة وصل هذه الشبكات من أجل المولد المتوافقة غير المحمل .

إذ توصل هذه الشبكات على التسلسل بالنسبة لمقطع خط مع الأرض على المولد .

من المعادلات (6-1) و (6-3) و (6-4) لدينا :

$$E_g - I_{a1} Z_{g1} - I_{a2} Z_{g_2} - I_{a0} Z_{g0} = 0 \Rightarrow$$

$$E_g = I_{a1} Z_{g_1} + I_{a2} Z_{g2} + I_{a0} Z_{g0}$$

$$E_g = I_{a_1}(Z_{g_1} + Z_{g_2} + Z_{g_0}) \Rightarrow$$

$$I_{a1} = \frac{E_g}{Z_{g_1} + Z_{g_2} + Z_{g_0}} \quad \text{---- (6-5)}$$

لكن : $I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{1}{3} I_a \Leftarrow$

$$I_a = \frac{3E_g}{Z_{g_1} + Z_{g_2} + Z_{g_0}}$$

فإذا كان تيار العطل I_f يساوي I_a يكون :

$$I_f = I_a = \frac{3E_g}{Z_{g_1} + Z_{g_2} + Z_{g_0}} \quad \text{---- (6-6)}$$

كذلك لدينا :

$$V_a = 0$$

$$V_b = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0}$$

بالتعويض حسب العلاقة (6-1) $\Leftarrow$

$$V_b = E_g \cdot \left[\frac{(a^2 - a) Z_{g_2} + (a^2 - 1) Z_{g_0}}{Z_{g_1} + Z_{g_2} + Z_{g_0}} \right] \quad \text{---- (6-7)}$$

$$V_c = a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_c = E_g \cdot \left[\frac{(a - a^2) Z_{g_2} + (a - 1) Z_{g_0}}{Z_{g_1} + Z_{g_2} + Z_{g_0}} \right] \quad \text{---- (6-8)}$$

إذا كانت جهود الخطوط V_{bC} ، V_{ca} ، V_{ab} معطاة بدلالة V_A ، V_B و V_C أي أن :

$$V_A = V_c - V_b \; ; \; V_B = V_a - V_c \; ; \; V_C = V_b - V_a$$

فإننا نحصل بالتعويض وإجراء بعض العمليات الرياضية البسيطة على الآتي :

$$V_A = V_c - V_b = (a - a^2) \cdot E_g \cdot \left(\frac{2Z_{g_2} + Z_{g_0}}{Z_{g_1} + Z_{g_2} + Z_{g_0}} \right) \quad \text{----(6-9)}$$

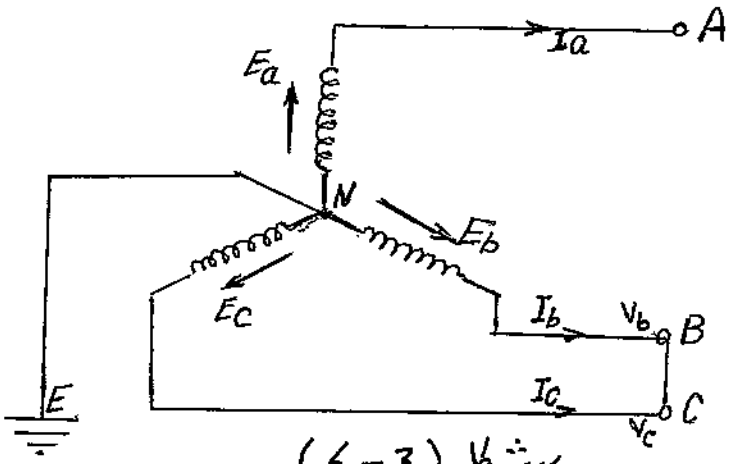
$$V_B = V_a - V_c = E_g \cdot \left[\frac{(a^2 - a) Z_{g_2} + (1 - a) Z_{g_0}}{Z_{g_1} + Z_{g_2} + Z_{g_0}} \right] \quad \text{------(6-10)}$$

$$V_C = V_b - V_a = E_g \cdot \left[\frac{(a^2 - a) Z_{g_2} + (a^2 - 1) Z_{g_0}}{Z_{g_1} + Z_{g_2} + Z_{g_0}} \right] \quad \text{------(6-11)}$$

ب - عطل بين خطين :

من الشكل (6-3) نجد :

$$\left.\begin{aligned} I_a &= 0 \\ I_b + I_c &= 0 \\ V_b &= V_c \end{aligned}\right\} \quad ---(6-12)$$



شكل (6-3)

باستعمال العلاقات بين المركبات المتماثلة المختلفة نجد :

$$\Leftarrow \begin{cases} I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = 0 \\ I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2 I_c) = \frac{1}{3}(a - a^2) I_b \\ I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + aI_c) = \frac{1}{3}(a^2 - a) I_b \end{cases}$$

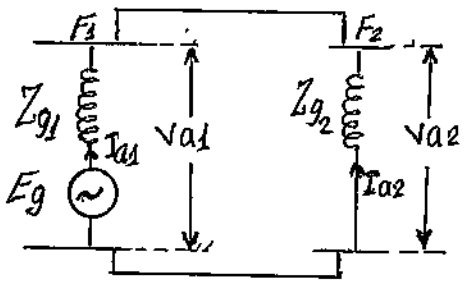
$$\left.\begin{aligned} I_{a1} &= -I_{a2} \\ I_{a1} + I_{a2} &= 0 \\ I_{a0} &= 0 \end{aligned}\right\} \quad --(6-13)$$

$$V_{a0} = -I_{a0} Z_{g0} = 0$$

$$\left.\begin{aligned} V_{a1} &= \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2 V_c) = \frac{1}{3}(V_a - V_b) \\ V_{a2} &= \frac{1}{3}(V_a + a^2 V_b + aV_c) = \frac{1}{3}(V_a - V_b) \end{aligned}\right\} \Rightarrow$$

$$V_{a1} = V_{a2} \quad ---(6-14)$$

من المعادلتين (6-13) و (6-14) فإن المركبات المتماثلة للمولدات المختلفة توصل مع بعضها كما هو مبين في الشكل (6-4)



شكل (6-4)
المركبات المتماثلة للمولدات المختلفة

$$V_{a1} = V_{a2}$$

$$E_g - I_{a1} Z_{g1} = -I_{a2} Z_{g2}$$

$$E_g = I_{a1} Z_{g1} - I_{a2} Z_{g2} = -I_{a2}(Z_{g1} + Z_{g2}) \Rightarrow$$

$$I_{a1} = -I_{a2} = \frac{E_g}{Z_{g1} + Z_{g2}} \quad ----(6-15)$$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = 0$$

$$I_b = a^2 I_{a1} + a I_{a2} = (a^2 - a) I_{a1} = \frac{(a^2 - a) E_g}{Z_{g1} + Z_{g2}}$$

$$I_c = a I_{a1} + a^2 I_{a2} = (a - a^2) I_{a1} = \frac{(a - a^2) E_g}{Z_{g1} + Z_{g2}} \quad \text{---(6-16)}$$

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} = 2 V_{a2} = -2 I_{a2} Z_{g2} \Rightarrow$$

$$V_a = \frac{2 E_g Z_{g2}}{Z_{g1} + Z_{g2}}$$

$$V_b = a^2 V_{a1} + a V_{a2} = -V_{a2} = \frac{-E_g Z_{g2}}{Z_{g1} + Z_{g2}} \quad \text{---(6-17)}$$

$$V_c = a V_a + a^2 V_{a2} = -V_{a2} = \frac{-E_g Z_{g2}}{Z_{g1} + Z_{g2}}$$

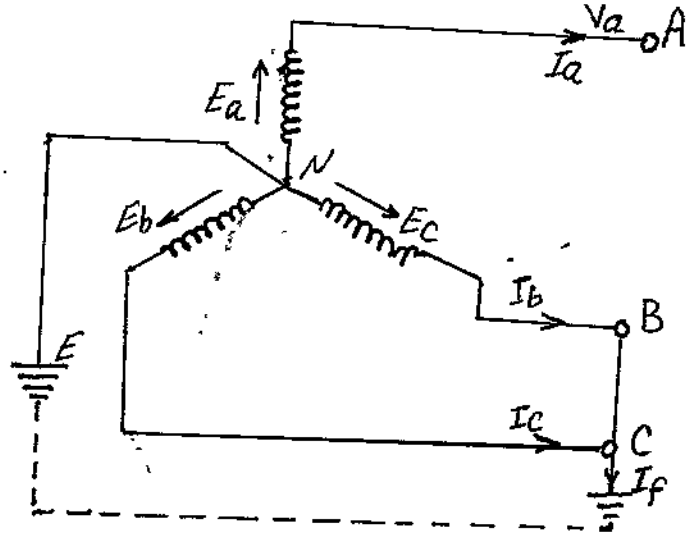
أما الجهود الخطية (المثلثية) هي :

$$V_A = V_c - V_b = 0$$

$$V_B = V_a - V_c = \left(\frac{3 E_g Z_{g2}}{Z_{g1} + Z_{g2}}\right) \quad \text{----(6-18)}$$

$$V_C = V_b - V_a = -\left(\frac{3 E_g Z_{g2}}{Z_{g1} + Z_{g2}}\right)$$

د- عطل بين خطين مع الأرض :



الشكل (6-5)

من الشكل (6-5) لدينا

$$\left.\begin{aligned} I_a &= 0 \\ I_b + I_c &= I_f \\ V_b &= V_c = 0 \end{aligned}\right\} \quad \text{---(6-19)}$$

بما أن $I_a = 0 \Rightarrow$

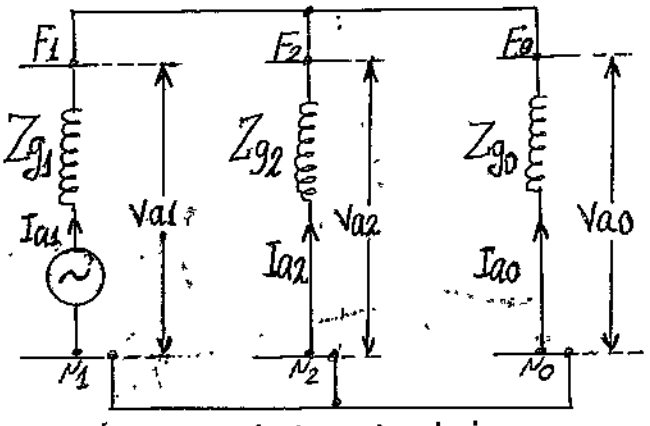
$$I_{ao} + I_{a1} + I_{a2} = 0 \quad \text{---(6-20)}$$

$$\left.\begin{aligned} V_{ao} &= \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) = \frac{1}{3} V_a \\ V_{a1} &= \frac{1}{3}(V_a + a^2 V_b + a V_c) = \frac{1}{3} V_a \\ V_{a2} &= \frac{1}{3}(V_a + a V_b + a^2 V_c) = \frac{1}{3} V_a \end{aligned}\right\} \Rightarrow$$

$$V_{ao} = V_{a1} = V_{a2} = \frac{1}{3} V_a \quad \text{----(6-21)}$$

جامعة حلب
الكلية التطبيقية

من المعادلتين (6-21) و (6-20) فإن السيطرات المثلة للسلاسل المختلفة توصل مع بعضها كما هو مبين في الشكل (6-6)



شكل (6-6)
السيطرات المثلة للسلاسل المختلفة

من المعادلة (6-21) نكتب :

$$V_{ao} = V_{a2}$$

$$-I_{ao}Z_{go} = -I_{a2}Z_{g2}$$

$$I_{ao} = \left(\frac{Z_{g2}}{Z_{go}}\right) I_{a2} \quad ----(6-22)$$

$$V_{a1} = V_{a2}$$

$$E_g - I_{a1}Z_{g1} = -I_{a2}Z_{g2}$$

$$I_{a2} = -\left(\frac{E_g - I_{a1}Z_{g1}}{Z_{g2}}\right) \quad ---(6-23)$$

من المعادلات (6-20) ، (6-22) و (6-23) يمكننا أن نكتب بعد إجراء عدة عمليات تعويض رياضية :

$$\left.\begin{aligned} I_{a1} &= \left(\frac{Z_{go} + Z_{g2}}{Z_{g1}Z_{g2} + Z_{g1}Z_{go} + Z_{go}Z_{g2}}\right) \cdot E_g \\ I_{a2} &= \left(\frac{-Z_{go}}{Z_{g1}Z_{g2} + Z_{g1}Z_{go} + Z_{go}Z_{g2}}\right) \cdot E_g \\ I_{a2} &= \left(\frac{-Z_{g2}}{Z_{g1}Z_{g2} + Z_{g1}Z_{go} + Z_{go}Z_{g2}}\right) \cdot E_g \end{aligned}\right\} \quad ----(6-24)$$

عندئذ نكتب :

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{ao} = 0 \quad ----$$

$$I_b = a^2 I_{a1} + a I_{a2} + I_{ao}$$

$$I_b = \left[\frac{(a^2-1)Z_{g2} + (a^2-a)Z_{go}}{Z_{g1}Z_{g2} + Z_{g1}Z_{go} + Z_{go}Z_{g2}}\right] \cdot E_g \quad ----(6-25)$$

$$I_c = a I_{a1} + a^2 I_{a2} + I_{ao}$$

$$I_c = \left[\frac{(a-1)Z_{g2} + (a-a^2)Z_{go}}{Z_{g1}Z_{g2} + Z_{g1}Z_{go} + Z_{go}Z_{g2}}\right] \cdot E_g$$

تيار العطل I_f يساوي :

$$I_f = I_b + I_c$$

$$I_f = \left[\frac{(a+a^2-2)Z_{g2}}{Z_{g1}Z_{g2}+Z_{g1}Z_{g0}+Z_{g0}Z_{g2}}\right]\cdot E_g$$

$$I_F = \left[\frac{-3Z_{g2}}{Z_{g1}Z_{g2}+Z_{g1}Z_{g0}+Z_{g0}Z_{g2}}\right]\cdot E_g \quad \text{----(6-26)}$$

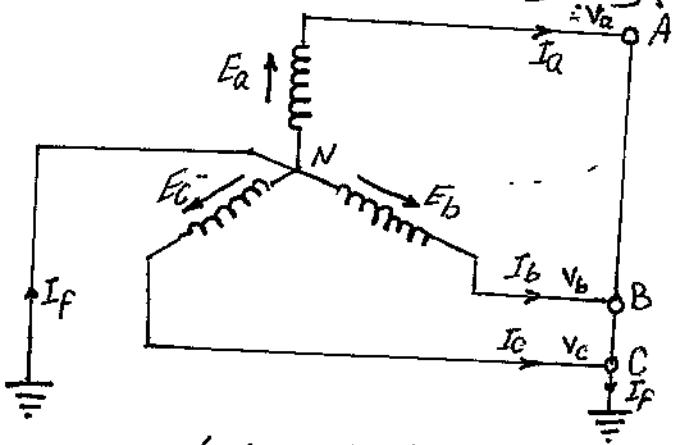
$$V_a = V_{a1}+V_{a2}+V_{a0} = 3V_{a0} = -3I_{a0}Z_{g0}$$

$$\left.\begin{aligned} V_a &= \left(\frac{3Z_{g0}Z_{g2}}{Z_{g1}Z_{g2}+Z_{g1}Z_{g0}+Z_{g0}Z_{g2}}\right)\cdot E_g \\ V_b &= V_{a0}+a^2V_{a1}+aV_{a2} = (1+a^2+a)V_{a1} = 0 \\ V_c &= V_{a0}+aV_{a1}+a^2V_{a2} = (1+a+a^2)V_{a0} = 0 \end{aligned}\right\} \text{---(6-27)}$$

أما الجهود المثلثية المقابلة فهي :

$$\left.\begin{aligned} V_A &= V_c - V_b = 0 \\ V_B &= V_a - V_c = \left(\frac{3Z_{g0}Z_{g2}}{Z_{g1}Z_{g2}+Z_{g1}Z_{g0}+Z_{g0}Z_{g2}}\right)\cdot E_g \\ V_C &= V_b - V_a = \left(\frac{-3Z_{g0}Z_{g2}}{Z_{g1}Z_{g2}+Z_{g1}Z_{g0}+Z_{g0}Z_{g2}}\right)\cdot E_g \end{aligned}\right\} \text{---(6-28)}$$

د- عطل ثلاثي الأطوار مع الأرض أو بدون الأرض :



مثال (6-7)

من المثال (6-7) نجد :

$$\left.\begin{aligned} I_a + I_b + I_c &= 0 \\ V_a = V_b &= V_c = 0 \end{aligned}\right\} \text{---(6-29)}$$

$$I_{a1} = \tfrac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = 0$$

$$V_{a1} = \tfrac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) = 0$$

$$V_{a2} = \tfrac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) = 0$$

$$V_{a0} = \tfrac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) = 0$$

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} = 0$$

$$V_{a2} = -I_{a2}Z_{g2}$$

$$0 = -I_{a2}Z_{g2}$$

$$Z_{g2} \neq 0 \Rightarrow I_{a2} = 0$$

بالمثل :

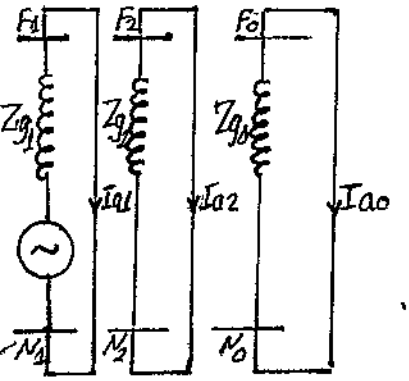
$$I_{a0} = 0$$

و :

$$V_{a1} = E_g - I_{a1} Z_{g1} = 0$$

$$I_{a1} = \frac{E_g}{Z_{g1}}$$

والخلاصة :



شكل (6-8)
الشبكات المماثلة للتسلسلات المتتالية

$$I_{a1} = \frac{E_g}{Z_{g1}} \quad , \quad I_{a2} = 0 \quad , \quad I_{a0} = 0 \quad \text{--- (6-30)}$$

$$V_{a1} = V_{a2} = V_{a0} = 0 \quad \text{---- (6-31)}$$

استناداً إلى المعادلتين (6-30) و (6-31) يمكن أن نصل شبكات التواقيات المختلفة كما هو مبين في الشكل (6-8).

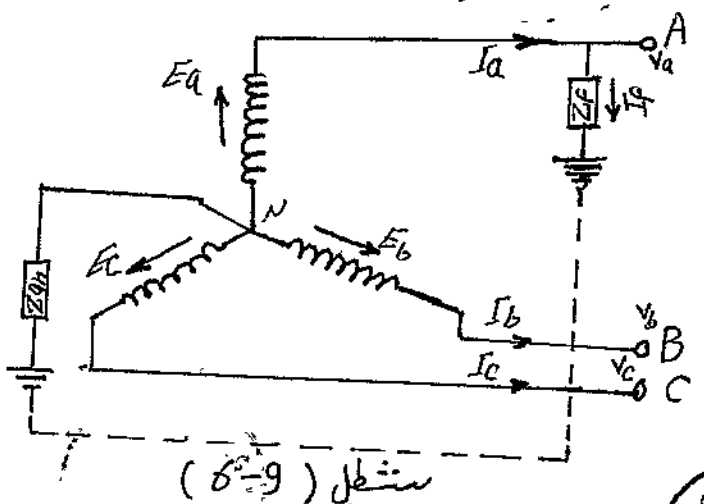
تيار العطل = تيار الطور ⇐

$$I_f = I_a = \frac{E_g}{Z_{g1}} \quad \text{----(6-32)}$$

* أثر ممانعة العطل على تيارات العطل :

كما ذكرنا سابقاً من أن العطل في الشبكة ينتج عند انهيار العازلية (بين ناقل الخط والأرض أو بين ناقلين) مع الأرض ، وأن احتمال وجود ممانعة ما بين ناقل الخط والأرض قد تعيق تيار العطل عبر الدارة ، لكن وإلى الآن في التحليل السابق افترضنا أن ممانعة العطل صفرية جداً يمكن إهمالها (لتسهيل الحساب والفهم) ولكن في أكثر الحالات تكون عالية ومن أجل الحالات الدقيقة لتيار العطل من المهم أخذ أثر هذه الممانعة بعين الاعتبار ، ونظراً لأن التحليل الحسابي سيتم بنفس الخطوات السابقة فلن نقوم بالاستخراج التفصيلي للمعادلات الرئيسية بل سنكتفي برسم بسيط لكل حالة وكتابة المعادلات الموافقة لتلك الحالة من العطل .

آ - أثر الممانعة على عطل أحد الأطوار مع الأرض :



شكل (6-9)

من الشكل نجد : (6-33)

$$\left.\begin{aligned} V_a &= I_a Z_f \\ I_b &= I_c = 0 \end{aligned}\right\}$$

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \tfrac{1}{3} I_a$$

$$I_{a1} = \frac{E_g}{(Z_{g1} + Z_{g2} + Z_{g0} + 3Z_{gn} + 3Z_{gf})} \quad \text{---(6-34)}$$

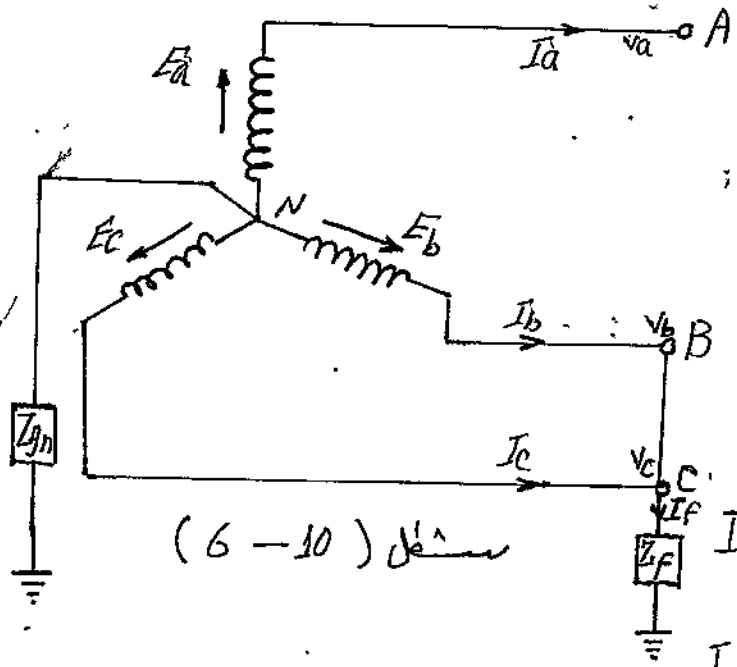
$$I_a = \frac{3E_g}{(Z_{g1} + Z_{g2} + Z_{g0} + 3Z_{gn} + 3Z_f)} \quad (6-35)$$

$$V_a = I_a Z_f = \left(\frac{3Z_f}{Z_{g_1}+Z_{g_2}+Z_{g_0}+3Z_{g_n}+3Z_f}\right)\cdot E_g \quad \text{---(6-36)}$$

$$V_b = \left[\frac{(a^2-a)Z_{g_2}+(a^2-1)(Z_{g_0}+3Z_{g_n}+3Z_f)}{Z_{g_1}+Z_{g_2}+Z_{g_0}+3Z_{g_n}+3Z_f}\right]\cdot E_g \quad \text{--(6-37)}$$

$$V_c = \left[\frac{(a-a^2)Z_{g_2}+(a-1)(Z_{g_0}+3Z_{g_n}+3Z_f)}{Z_{g_1}+Z_{g_2}+Z_{g_0}+3Z_{g_n}+3Z_f}\right]\cdot E_g \quad \text{--(6-38)}$$

ب - عطل طورين مع الأرض :



شكل (6 - 10)

من الشكل نجد :

$$\left.\begin{aligned} &I_a = 0 \\ &I_b + I_c = I_f \\ &V_b = V_c = I_f \cdot Z_f \end{aligned}\right\} \quad \text{---(6-39)}$$

$$\left.\begin{aligned} I_{a0} &= -\left[\frac{Z_{g2}}{Z_{g_1}Z_{g_2}+(Z_{g_0}+3Z_{g_n}+3Z_f)(Z_{g_1}+Z_{g_2})}\right]\cdot E_g \\ I_{a1} &= \left[\frac{Z_{g_0}+3Z_{g_n}+3Z_f+Z_{g_2}}{Z_{g_1}Z_{g_2}+(Z_{g_0}+3Z_{g_n}+3Z_f)(Z_{g_1}+Z_{g_2})}\right]\cdot E_g \\ I_{a2} &= \left[-\frac{(Z_{g_0}+3Z_{g_n}+3Z_f)}{Z_{g_1}+Z_{g_2}+(Z_{g_0}+3Z_{g_n}+3Z_f)(Z_{g_1}+Z_{g_2})}\right]\cdot E_g \end{aligned}\right\} \quad \text{-(3-40)}$$

$$\left.\begin{aligned} I_b &= \left[\frac{(a^2-1)Z_{g_2}+(a^2-a)(Z_{g_0}+3Z_{g_n}+3Z_f)}{Z_{g_1}Z_{g_2}+(Z_{g_0}+3Z_{g_n}+3Z_f)(Z_{g_1}+Z_{g_2})}\right]\cdot E_g \\ I_c &= \left[\frac{(a-1)Z_{g_2}+(a-a^2)(Z_{g_0}+3Z_{g_n}+3Z_f)}{Z_{g_1}Z_{g_2}+(Z_{g_0}+3Z_{g_n}+3Z_f)(Z_{g_1}+Z_{g_2})}\right]\cdot E_g \\ I_f = I_b + I_c &= \left[\frac{-3Z_{g_2}}{Z_{g_1}Z_{g_2}+(Z_{g_0}+3Z_{g_n}+3Z_f)(Z_{g_1}+Z_{g_2})}\right]\cdot E_g \end{aligned}\right\} \quad \text{---(3-41)}$$

$$\left.\begin{aligned} V_a &= \left[\frac{3(Z_{g_0}+3Z_{g_n}+3Z_f)Z_{g_1}}{Z_{g_1}Z_{g_2}+(Z_{g_0}+3Z_{g_n}+3Z_f)(Z_{g_1}+Z_{g_2})}\right]\cdot E_g \\ V_c = V_b &= \left[\frac{-3Z_{g_2}Z_f}{Z_{g_1}Z_{g_2}+(Z_{g_0}+3Z_{g_n}+3Z_f)(Z_{g_1}+Z_{g_2})}\right]\cdot E_g \end{aligned}\right\} \quad \text{---(3-42}$$

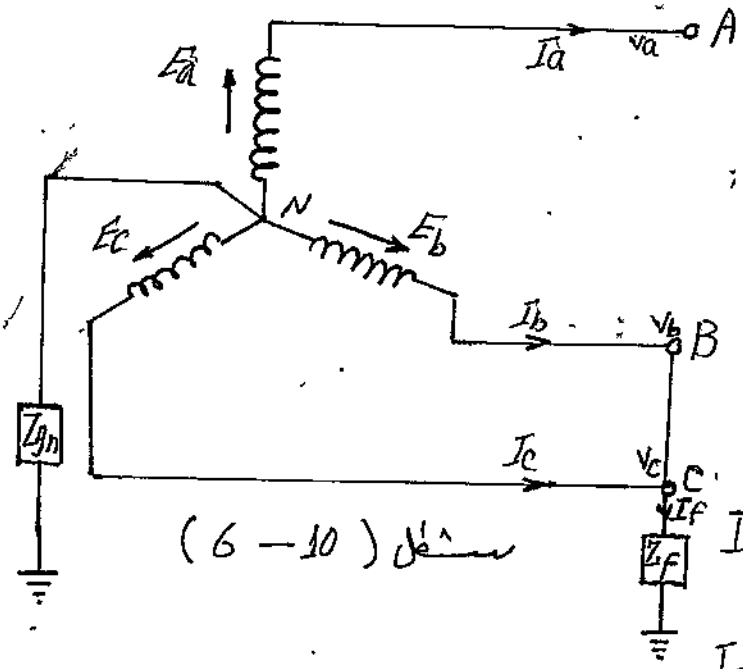
جامعة حماه
الكلية التطبيقية

$$V_a = I_a Z_f = \left(\frac{3Z_f}{Z_{g1}+Z_{g2}+Z_{g0}+3Z_{gn}+3Z_f}\right)\cdot E_g \quad \text{---(6-36)}$$

$$V_b = \left[\frac{(a^2-a)Z_{g2}+(a^2-1)(Z_{g0}+3Z_{gn}+3Z_f)}{Z_{g1}+Z_{g2}+Z_{g0}+3Z_{gn}+3Z_f}\right]\cdot E_g \quad \text{--(6-37)}$$

$$V_c = \left[\frac{(a-a^2)Z_{g2}+(a-1)(Z_{g0}+3Z_{gn}+3Z_f)}{Z_{g1}+Z_{g2}+Z_{g0}+3Z_{gn}+3Z_f}\right]\cdot E_g \quad \text{--(6-38)}$$

ب - عطل طورين مع الأرض :



من الشكل (6-10) نجد :

$$\left.\begin{aligned} &I_a = 0 \\ &I_b + I_c = I_f \\ &V_b = V_c = I_f \cdot Z_f \end{aligned}\right\} \quad \text{---(6-39)}$$

$$\left.\begin{aligned} I_{a0} &= -\left[\frac{Z_{g2}}{Z_{g1}Z_{g2}+(Z_{g0}+3Z_{gn}+3Z_f)(Z_{g1}+Z_{g2})}\right]\cdot E_g \\ I_{a1} &= \left[\frac{Z_{g0}+3Z_{gn}+3Z_f+Z_{g2}}{Z_{g1}Z_{g2}+(Z_{g0}+3Z_{gn}+3Z_f)(Z_{g1}+Z_{g2})}\right]\cdot E_g \\ I_{a2} &= \left[-\frac{(Z_{g0}+3Z_{gn}+3Z_f)}{Z_{g1}+Z_{g2}+(Z_{g0}+3Z_{gn}+3Z_f)(Z_{g1}+Z_{g2})}\right]\cdot E_g \end{aligned}\right\} \quad \text{-(3-40)}$$

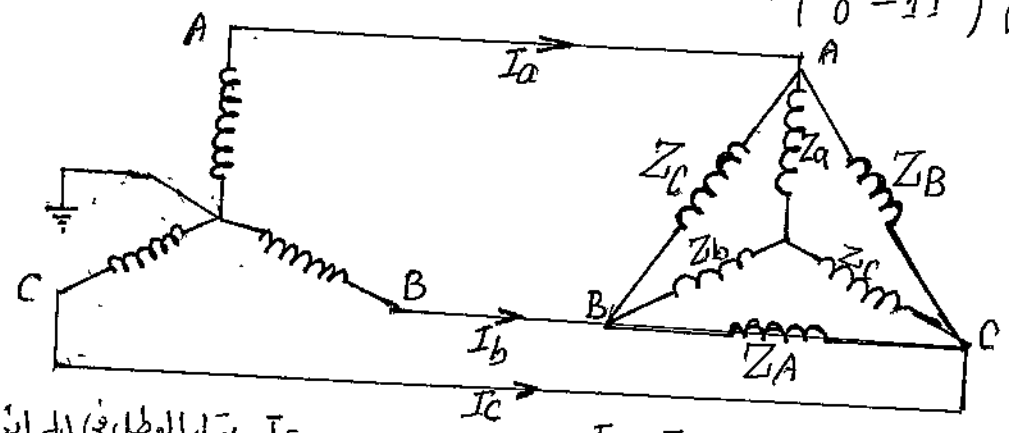
$$\left.\begin{aligned} I_b &= \left[\frac{(a^2-1)Z_{g2}+(a^2-a)(Z_{g0}+3Z_{gn}+3Z_f)}{Z_{g1}Z_{g2}+(Z_{g0}+3Z_{gn}+3Z_f)(Z_{g1}+Z_{g2})}\right]\cdot E_g \\ I_c &= \left[\frac{(a-1)Z_{g2}+(a-a^2)(Z_{g0}+3Z_{gn}+3Z_f)}{Z_{g1}Z_{g2}+(Z_{g0}+3Z_{gn}+3Z_f)(Z_{g1}+Z_{g2})}\right]\cdot E_g \\ I_f = I_b + I_c &= \left[\frac{-3Z_{g2}}{Z_{g1}Z_{g2}+(Z_{g0}+3Z_{gn}+3Z_f)(Z_{g1}+Z_{g2})}\right]\cdot E_g \end{aligned}\right\} \quad \text{---(3-41)}$$

$$\left.\begin{aligned} V_a &= \left[\frac{3(Z_{g0}+3Z_{gn}+3Z_f)Z_{g1}}{Z_{g1}Z_{g2}+(Z_{g0}+3Z_{gn}+3Z_f)(Z_{g1}+Z_{g2})}\right]\cdot E_g \\ V_c = V_b &= \left[\frac{-3Z_{g2}Z_f}{Z_{g1}Z_{g2}+(Z_{g0}+3Z_{gn}+3Z_f)(Z_{g1}+Z_{g2})}\right]\cdot E_g \end{aligned}\right\} \quad \text{---(3-42)}$$

جامعة حماه
الكلية التطبيقية

حـ - الأطوار الثلاثة مؤرضة ، أو الأطوار الثلاثة موصولة معاً بدون وجود الأرض .

عندما تؤرض الأطوار الثلاثة عبر مقاومات العطل ، فإن الحالة تصبح مطابقة لمولد نجمي موصول مع حمولة نجمية ، ولكن عندما توصل الأطوار الثلاثة مع بعضها مع مقاومة نجمي موصول مع حمولة نجمية ، ولكن عندما تشمل الأرض فتصبح الحالة مطابقة إلى مولد نجمي موصول إلى حمولة مثلثية كما في الشكل (6-11) :



شكل (6-11)

من الشكل نجد أن :

$$\begin{cases} I_a + I_b + I_c = 0 \\ V_a = V_b = V_c = I_{fy} \cdot Z_{fy} \end{cases}$$

حيث : I_{fy} - تيار العطل في المقاومات المطابقة الموصلة نجمياً .

Z_{fy} - المقاومة النجمية المطابقة

وتساوي $Z_{fy} = \frac{1}{3} Z_f$

وحيث أنه بالفرض مقاومة العطل Z_f هي نفسها بين كل طورين (A-B) و (B-C) و (C-A) ؛

$$\left.\begin{aligned} I_{a0} &= \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c) = 0 \\ V_{a1} &= \frac{1}{3}(V_a + a V_b + a^2 V_c) = 0 \\ V_{a2} &= V_{a0} = 0 \Rightarrow I_{a2} = I_{a0} = 0 \end{aligned}\right\} \quad \text{---(3-43)}$$

أي أنه هناك تيارات التسلسل الموجب في ملفات المحرض المولد :

$$E_g = I_{a1} Z_{g1} + I_{a1} Z_{fy} = 0$$

$$I_{a1} = \frac{E_g}{(Z_{g1} + Z_{fy})} \quad \text{-----(3-44)}$$

وتيار العطل I_f هو أيضاً نفس تيار التسلسل الموجب :

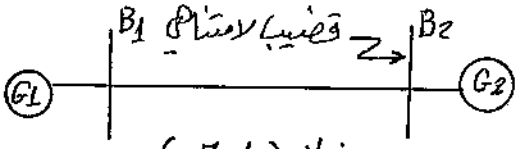
$$I_f = I_{a1} = \frac{E_g}{(Z_{g1} + Z_{fy})} \quad \text{---(3-45)}$$

= . = . = . = . = . = . =

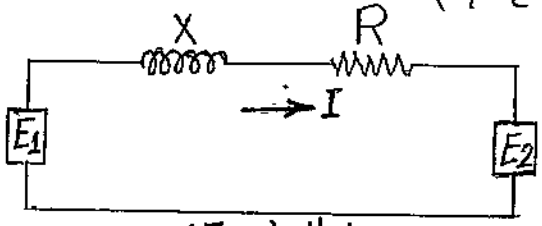
* الاستقرار في الحالة الثابتة (Steady State Stability):

تعتبر الشبكة مستقرة إذا ما حافظت المنوبات على التواقت فيما بينها، أي إذا دارت بسرعة التواقت، والاستقرار في الحالة الثابتة هو قابلية الآلة للحافظ على التواقت صحيح تغير استطاعتها بصورة تدريجية.

لكن لدينا آليتين (G_1 ، G_2) كما في الشكل (7-1) متصلتين بخط تغذية، ولنفرض أن المولد والمحرك عند القضيب المجمع (B_2) ثابتين حتى سيعمل (B_2) كقضيب مجمع لانهائي والدارة المكافئة لطرفي الشبكة هي كما في الشكل (7-2).

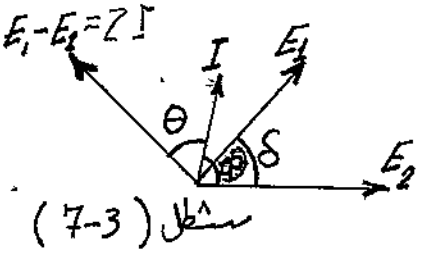


شكل (7-1)



شكل (7-2)

حيث: R - المقاومة الكلية للشبكة بين الآليتين بالطرف (بما فيها مقاومتي الآليتين).
X - المفاعلة الكلية للشبكة بين الآليتين بالطرف (بما فيها مفاعلتي الآليتين).
Z - الممانعة الكلية للشبكة بين الآليتين بالطرف (بما فيها ممانعتي الآليتين).
E_1 - القوة المحركة الكهربائية للآلة بالطرف G_1.
E_2 - القوة المحركة الكهربائية للآلة بالطرف G_2.



شكل (7-3)

من هذه الدارة المكافئة ينتج أن:

$$E_1 = E_2 + ZI$$

حيث: $Z = R + jX$، وباتخاذ E_2 كمرجع ينتج:

$$I = \frac{E_1 \angle \delta - E_2}{Z \angle \theta} = I \angle \theta \quad \cdots\cdots (7-1)$$

والمخطط السماعي للشبكة مبين في الشكل (7-3) فإذا كان:
P_2 - الاستطاعة الفعلية المغذاة للآلة G_2.
Q_2 - الاستطاعة الردفعلية المغذاة للآلة G_2.
فيكون لدينا:

$$P_2 + jQ_2 = E_2 I = E_2 \left(\frac{E_1 \angle \delta - E_2}{Z \angle \theta} \right)$$

$$P_2 - jQ_2 = -\frac{E_2^2}{Ze^{j\theta}} + \frac{E_1 E_2 e^{j\delta}}{Ze^{j\theta}} = -\frac{E_2^2 \cdot e^{-j\theta}}{Z} + \frac{E_1 E_2}{Z} e^{j(\delta-\theta)} \quad \cdots (7-2)$$

وبالتالي فإن:
الاستطاعة الفعلية = الجزء الحقيقي من الطرف الأيمن أي أن:

$$P = -\frac{E_2^2}{Z} \cos\theta + \frac{E_1 E_2}{Z} \cos(\delta - \theta) \quad \cdots\cdots (7-3)$$

جامعة حماه
الكلية التطبيقية

بما أن الزاوية (θ) قريبة من الدرجة (90°)، لذلك نستطيع استخدام ($\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta$) في المعادلة (7-3) وبالتعويض ينتج:

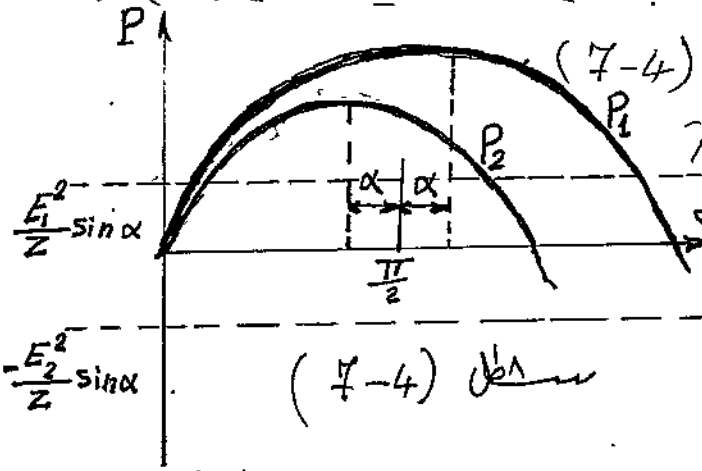
$$P_2 = -\frac{E_2^2}{Z}\sin\alpha + \frac{E_1 E_2}{Z}\sin(\delta+\alpha) \quad ---(7-4)$$

حيث: α + تدعى زاوية الضياع (Loss Angle).

وبنفس الطريقة نستنتج الاستطاعة الفعلية الصادرة عن G_1، أي:

$$P_1 = \frac{E_1^2}{Z}\sin\alpha + \frac{E_1 E_2}{Z}\sin(\delta-\alpha) \quad ---(7-5)$$

أي أن كلاً من الاستطاعة المرسلة والمستقبلة هي تابع جيبي للزاوية (δ) بين القوى المولدة - الكهربائية للآليتين، شكل (7-4) فلزيادة الاستطاعة المنقولة على الشبكة يجب زيادة زاوية الطور (δ) بين القوى المولدة الكهربائية للآليتين. حيث يوجد حدود لهذه الزيادة وهي استباق الاستطاعة المرسلة قيمتها العظمى.



شكل (7-4)

تبلغ الاستطاعة المرسلة قيمتها العظمى حينما تكون ($\delta = \frac{\pi}{2} + \alpha$) المعادلة (7-5) تصبح:

$$P_{1max} = \frac{E_1^2}{Z}\sin\alpha + \frac{E_1 E_2}{Z}$$

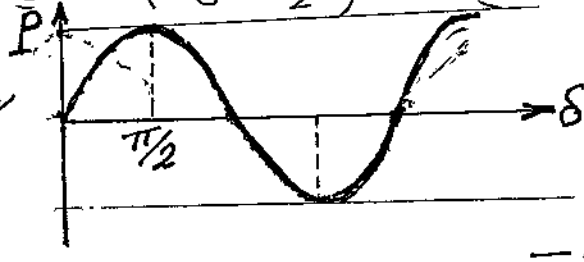
كما أن الاستطاعة المستقبلة تبلغ قيمتها العظمى حينما تكون ($\delta = \frac{\pi}{2} - \alpha$)

$$P_{2max} = -\frac{E_2^2}{Z}\sin\alpha + \frac{E_1 E_2}{Z}$$

يلاحظ بأن الاستطاعة المستقبلة تصل قيمتها العظمى قبل الاستطاعة المرسلة. وهذا هو حد الاستقرار في الحالة الثابتة، أي حينما تتغير الاستطاعة بصورة تدريجية، وبعد هذا الحد تنقص الاستطاعة المستقبلة بازدياد زاوية (δ). فإذا أهملنا الضياع في الخط ينتج معنا:

$$P = P_1 = P_2 = \frac{E_1 E_2}{X}\sin\delta \quad ---(7-6)$$

حيث تبلغ الاستطاعة قيمتها العظمى حينما تكون ($\delta = \frac{\pi}{2}$)، كما في الشكل (7-5) أي أن زيادة الاستطاعة يمكن أن يتم برفع قيم التوتر أو تخفيض الممانعة Z أو زيادة قيمة (δ).



شكل (7-5)

جامعة حماة