الفصل 4

النواقل المتوازنة كهربائيا

تعريف الناقل الكهربائي : الناقل الكهربائي هو عبارة عن جسم يحوي على شحنات كهربائية يمكنها أن تتحرك فيه بحرية, وهناك أجسام لا تستطيع الشحنات الكهربائية التحرك فيه بحرية تسمى العوازل. وهناك مجموعة أخرى من الأجسام تستطيع نقل الشحنات ولكن بدرجة اقل من النواقل تسمى أنصاف (أشباه) النواقل.

تعريف الناقل في حالة توازن: نقول عن ناقل انه في حالة توازن كهر وساكن إذا كانت كل الشحنات المتواجدة بداخله ساكنة أي لا تخضع لأي قوة كهربائية.

خواص الناقل المتزن كهروستاتيكيا

1. الحقل الكهربائي داخل الناقل المتعادل أو المشحون في حالة توازن معدوم. فلو لم يكن معدوم لتسارعت الشحنات في الناقل بفعل هذا الحقل، و يفقد الناقل حالة اتزانه.

2. الشحنة (الكثافة الحجمية للشحنة ρ) داخل الناقل المتزن كهروستاتيكيا معدومة.

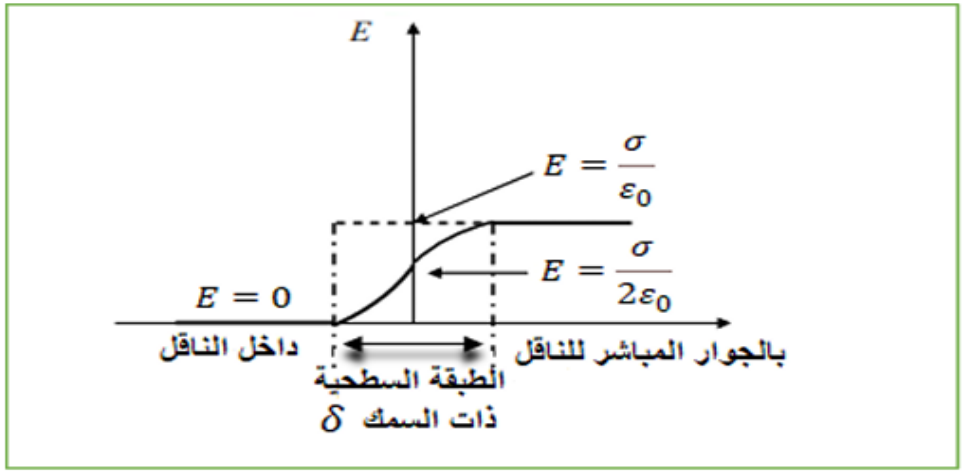
أي ناقل مشحون في حالة توازن فان الشحنات الكهربائية ستتوزع بالكامل على سطحه فقط بكثافة سطحية σ (في الواقع السطح يشغل سمك بضع طبقات من الذرات).

الحقل الكهروستاتيكي في المنطقة المجاورة مباشرة لناقل يحمل شحنة ذات كثافة سطحية σ يعطى بالعلاقة:

$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\,\vec{n}$$

العلاقة السابقة تعطي عبارة الحقل في المنطقة المجاورة مباشرة لناقل يحمل شحنة ذات كثافة سطحية σ بينما الحقل داخله معدوم. عند عبور سطح الناقل، بالاستمرارية، يتغير المجال كما هو موضح في الشكل (δ متناهية الصغر). على وجه الخصوص على سطح الناقل، فإنه يأخذ العبارة:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$$



الضغط الكهروستاتيكي

الشحنات الموجودة على سطح الناقل تكون خاضعة لقوى تنافر الشحنات الأخرى. لنحسب القوة المطبقة في وحدة السطح، و هو ما يسمى بالضغط الكهروستاتيكي (*pression électrostatique*). بما أن الضغط يتم في الطبقة السطحية لذلك نستعمل الحقل المتوسط $E_M = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$ و يكون الضغط:

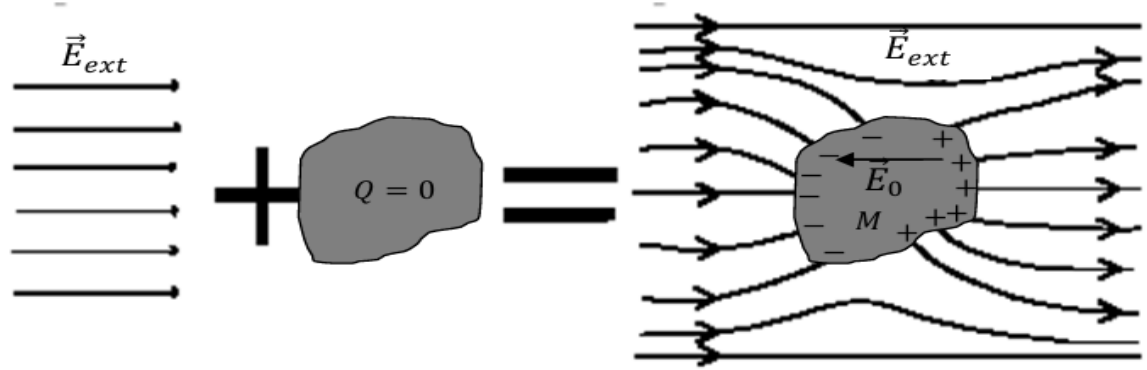
$$P = \frac{dF}{dS} = \frac{\sigma dS E_M}{dS} = \sigma E_M = \frac{\sigma^2}{2\varepsilon_0}$$

التأثير بين النواقل المشحونة

1. تأثير حقل كهربائي خارجي على ناقل متعادل معزول:

يحتوي الناقل المعزول المتعادل كهربائيا على شحنات حرة $(-e)$، و عندما يوضع في حقل كهربائي $\vec{E}_{ext}$ فإن الإلكترونات الحرة تنتقل في اتجاه معاكس للحقل، و يظهر على طرفي الناقل شحنات موجبة و سالبة بكميات متساوية، فيتولد عن هذا التوزيع الجديد للشحنات حقل كهربائي $\vec{E}_0$ معاكس لـ $\vec{E}_{ext}$، و يزداد مع تزايد نقل الالكترونات حتى يصل الناقل إلى حالة التوازن، و هو في حالة استقطاب، أي الحقل الداخلي في النقطة Mمعدوم:

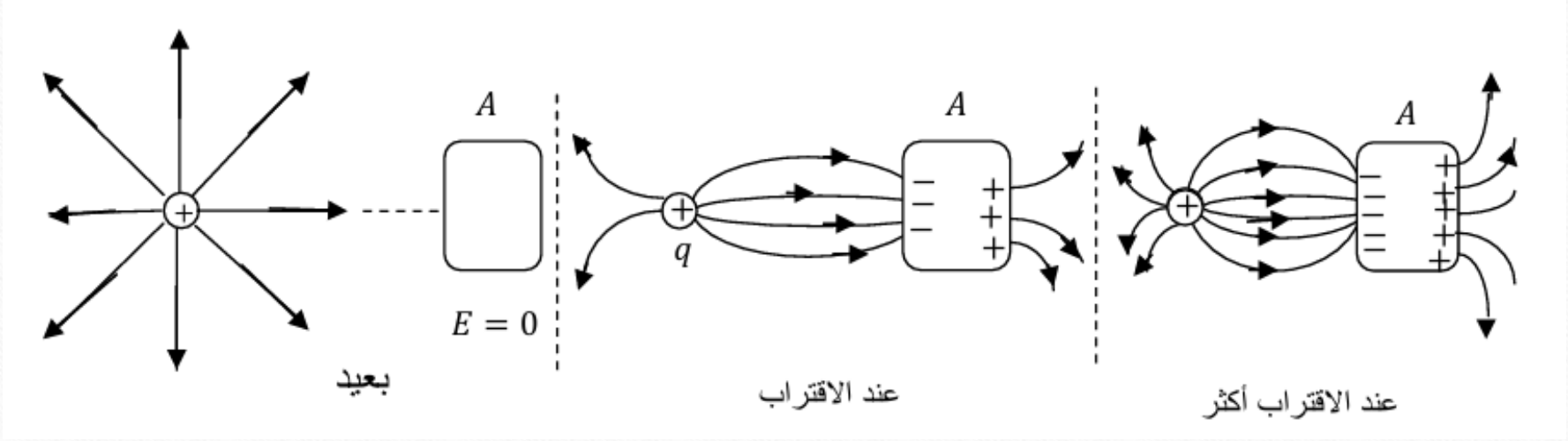
$$\vec{E}_{int}(M) = \vec{E}_{ext} + \overrightarrow{E_0} = \vec{0}$$



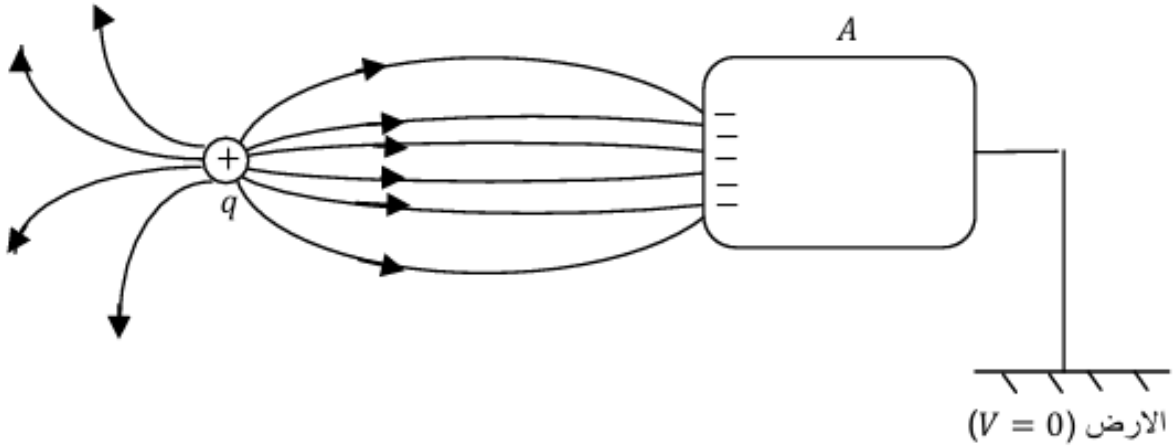
لم تتغير شحنة الناقل، كل ما حدث هو إعادة توزيع للشحنات، و تغير للكمون، حيث أصبحت تخرج خطوط الحقل من الناقل إلى اللانهاية.

2. التأثير الجزئي (*influence partielle*)

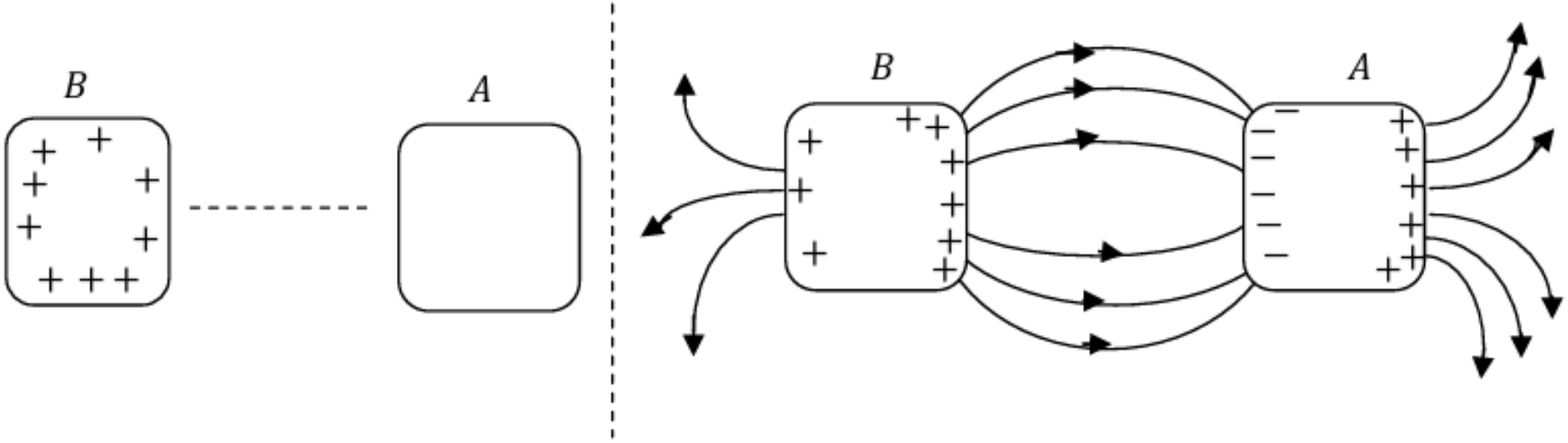
- توضح الأشكال الآتية التأثير المتزايد لشحنة موجبة q على ناقل A متعادل و معزول.



- إذا تم وصل الناقل A السابق بكمون ثابت، مثلا كمون يساوي الصفر عند وصله بالأرض، حيث تصبح الأرض و الناقل جسمًا واحدًا فتتسرب الشحنات الموجبة إلى الأرض، ويبقى كمون الناقل معدوم و لا يخرج منه أي خط أما الشحنات السالبة فتبقى مكانها لا تتسرب إلى الأرض بفعل التأثير من طرف الشحنة q.

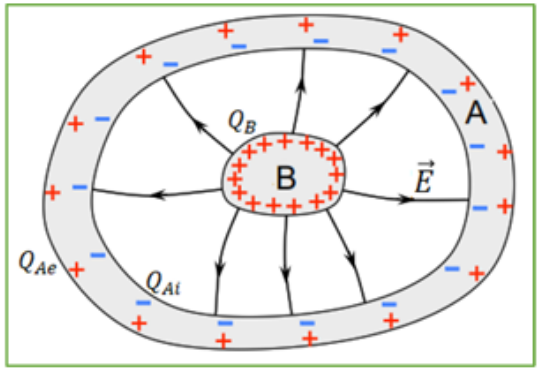


- **التأثير الرجعي**: إذا كانت الشحنة الموجبة موجودة على ناقل B فينتج تأثير رجعي من A على B يتغير توزيع شحنات الجسم A من خلال الحقل الذي ينشئه الناقل B (الناقل A دائما متعادل و معزول).



التأثير الكلي:

نتحدث عن التأثير الكلي عندما تنتهي جميع خطوط الحقل الكهربائي الصادرة عن الناقل B عند الناقل الثاني A. ويتحقق ذلك عندما يحيط الناقل Aالمتأثر كليا بالناقل B المشحون بـ Q_B (المؤثر). ويتم الحصول على هذا الوضع عندما يحيط A بالكامل بـ B ، كما يوضحه الشكل المقابل (11.3).



الشكل (11.3)

- الشحنة التي تظهر على السطح الداخلي للناقل A تساوي وتعاكس شحنة الناقل B، أي أن:

$$Q_B = -Q_{Ai}$$

- إذا كان الناقل A معزولا ومتعادلا من البداية، فإنه حسب مبدأ انحفاظ الشحنة للناقل A فإن:

$$Q_{Ai} + Q_{Ae} = 0$$

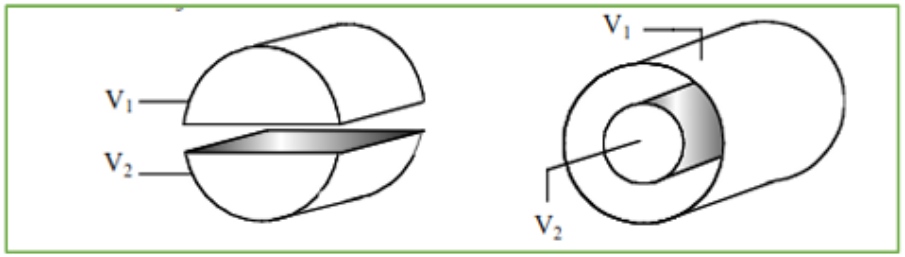
- إذا كان الناقل A معزولا ومشحونا بشحنة ابتدائية Q_0، فإنه وحسب مبدأ إنحفاظ الشحنة للناقل A يكون لدينا:

$$Q_{Ai} + Q_{Ae} = Q_0 \Rightarrow Q_{Ae} = Q_B + Q_0$$

المكثفات

التعريف: المكثفة هي جملة تتكون من ناقلين كهربائيين في تأثير كهر وساكن بينهما.

هناك نوعان من المكثفات:

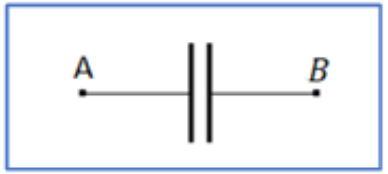


- ذات ناقلين متقاربين.

- ذات تأثير كلي.

الفضاء الذي يفصل بين الناقلين اما ان يكون الفراغ أو وسط عازل.

- نرمز للمكثفة في الدارات الكهربائية كما في الشكل ويدعى كل ناقل لبوس المكثفة، وبالتالي للمكثفة لبوسين.



ملاحظات

- من المهم أن نلاحظ أن المكثفة تتميز بالقيمة المطلقة للشحنة Q التي يحملها كل لبوس، وليست الشحنة الكلية للمكثفة والتي هي معدومة $(+Q - Q = 0)$. كما أنها تتميز بفرق الكمون V بين لبوسيها وليس كمون أحد لبوسيها بالنسبة لمرجع معين.

- إن اسم المكثفة، الذي يطلق على جملة مكونه من ناقلين في تأثير كلي، يأتي من حقيقة أن هذه الجمل تسلط الضوء على ظاهرة "تكثيف الكهرباء"، أي تراكم الشحنات الكهربائية على سطح لبوسين.

سعة مكثفة

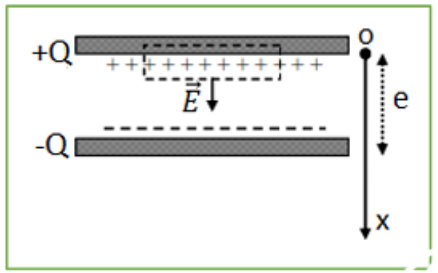
تعطى سعة مكثفة بما يلي :

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{V_1 - V_2}$$

Q هي الشحنة الذي يحملها كل لبوس من اللبوسين ($+Q$ لأحد اللبوسين و $-Q$ للآخر) و $V = V_1 - V_2$ هو فرق الكمون بين هذين اللبوسين. السعة هي قيمة ثابتة مميزة لكل مكثفة. وتعتمد قيمتها على الشكل والأبعاد والموقع النسبي للبوسين اللذين يشكلانها. كما يعتمد كذلك على طبيعة الوسط الذي يفصل بينهما.

سعة مكثفة مستوية:

لتكن المكثفة المستوية الشكل (15.3)، تتكون من ناقلين مستويين، يحملان شحنتين $+Q$ و $-Q$ على التوالي، مع سطحين مساحة كل منهما S مفصولين بمسافة e. نظرا لتماثل التوزيع، يكون المجال الكهربائي بين لبوسي هذه المكثفة منتظما،



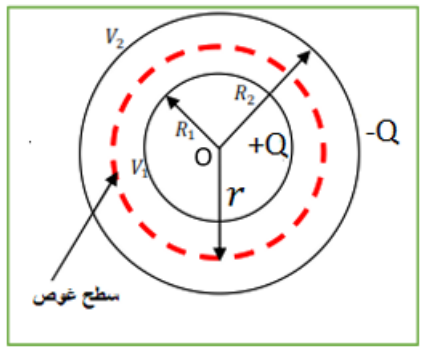
مكثفة مستوية

وبما ان: $C = \frac{Q}{V}$ فان سعة المكثفة المستوية تعطى بالعلاقة التالية:

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{e}$$

سعة مكثفة كروية:

تتكون المكثفة الكروية من كرتين لهما نفس المركز يفصل بينهما عازل. الاولى نصف قطرها R_1 وتحمل شحنة موجبة $+Q$ وكمونها الكهربائي هو V_1، اما الثانية نصف قطرها R_2 حيث $(R_2 > R_1)$ وتحمل شحنة $-Q$ وكمونها هو V_2.



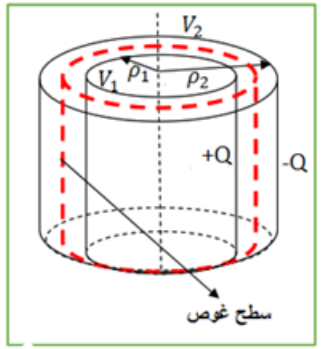
المكثفة الكروية

و تكون سعة المكثفة الكروية هي

$$C = \frac{Q}{V} \Rightarrow C = \frac{R_1 R_2}{K(R_2 - R_1)}$$

سعة مكثفة اسطوانية:

تتشكل المكثفة الأسطوانية من أسطوانتين ناقلتين لهما نفس المحور يفصل بينهما عازل وذات أنصاف أقطار على التوالي ρ_1 و ρ_2 وارتفاعها h. كل منهما مشحون بكثافة طولية (خطية) $+\lambda$ و $-\lambda$ على الترتيب.



المكثفة الاسطوانية

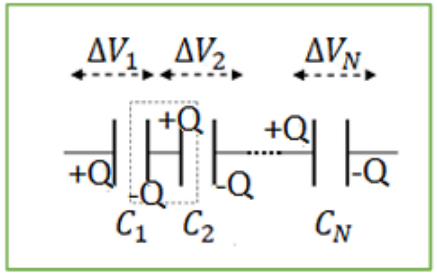
نتحصل على عبارة سعة المكثفة الاسطوانية:

$$V = \frac{Q}{2\pi h\varepsilon_0} ln\frac{\rho_2}{\rho_1} \Rightarrow C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi h\varepsilon_0}{ln\frac{\rho_2}{\rho_1}}$$

جمع المكثفات

جمع المكثفات على التسلسل:

نعتبر مجموعة تتألف من N مكثفة موصولة على التسلسل والموضحة في الشكل ادناه. عندما يتم تطبيق فرق الكمون $\Delta V = V_0 - V_N$ بين طرفي كل المكثفات الموصولة على التسلسل، فإن اللبوس الأيسر للمكثفة الأولى سوف يكتسب شحنة Q. بافتراض أن جميع المكثفات متعادلة في البداية، سوف يتم تراكم الشحنة $\pm Q$ (بالتأثير) على لبوسي المكثفات المجاورة. أي ان كل المكثفات لها نفس الشحنة Q وفرق الكمون الإجمالي بين طرفي جميع هذه المكثفات يساوي مجموع فروق الكمونات، ونكتب:



الجمع على التسلسل

$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{C_i} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots + \frac{1}{C_N}$$

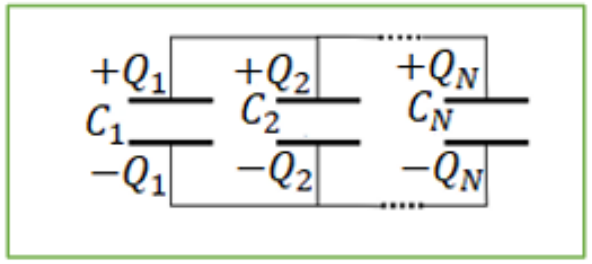
- مقلوب السعة المكافئة يساوي مجموع مقالب السعات.

- سعة المكثفة المكافئة دوما أصغر من سعة كل مكثفة من المكثفات الموصولة على التسلسل.

فائدة الجمع على التسلسل: يتم استخدام هذا التركيب عندما يكون فرق الكمون المطبق كبيرا ولا يمكن لمكثفة واحدة ان تتحمله.

جمع المكثفات على التفرع:

ليكن N مكثفة موصولة على التوازي كل المكثفات تخضع لنفس فرق الكمون V، وكل مكثفة سعتها C_i تحمل الشحنة الكهربائية Q_i.



الجمع على التفرع

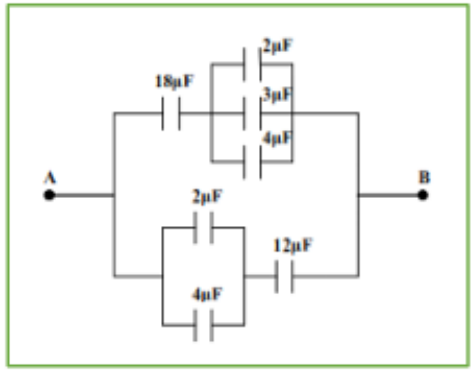
سعة المكثفة المكافئة تساوي مجموع سعات المكثفات الموصولة على التفرع.

$$C_{eq} = (C_1 + C_2 + \cdots + C_N) = \sum_{i=1}^{N} C_i$$

فائدة الربط على التوازي هو الحصول على مكثفة ذات سعة كبيرة جدا. سعة المكثفة المكافئة دوما أكبر من سعة كل مكثفة من المكثفات الموصولة على التوازي.

تطبيق:

يمثل الشكل المقابل شبكة من المكثفات موصولة على التسلسل والتفرع. أحسب سعة المكثفة المكافئة للدارة.



الحل:

حساب سعة المكثفة المكافئة للدارة:

- المكثفات ذات السعات $(2\mu F, 3\mu F, 4\mu F)$ موصولة على التوازي ومنه سعة المكثفة المكافئة هي C_1 :

$$C_1 = (2 + 3 + 4)\mu F = 9\mu F$$

- المكثفة C_1 والمكثفة $18\mu F$ موصولتان على التسلسل، ومنه سعة المكثفة المكافئة لهما هي C_2 ومنه:

$$\frac{1}{C_2}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{18}=\frac{1}{9}+\frac{1}{18}=\frac{1}{6}\ \Rightarrow C_2=6\mu F$$

- المكثفتان ذات السعات $(2\mu F, 4\mu F)$ موصولة على التوازي ومنه سعة المكثفة المكافئة هي C_3 :

$$C_3=(2+4)\mu F=6\mu F$$

- المكثفة C_3 والمكثفة $12\mu F$ موصولتان على التسلسل، ومنه سعة المكثفة المكافئة لهما هي C_4 ومنه:

$$\frac{1}{C_4}=\frac{1}{C_3}+\frac{1}{12}=\frac{1}{6}+\frac{1}{12}=\frac{1}{4}\ \Rightarrow C_4=4\mu F$$

- المكثفة C_2 والمكثفة C_4 موصولتان على التوازي، ومنه سعة المكثفة المكافئة لهما هي C_{eq} أي المكثفة المكافئة للدارة ومنه:

$$C_{eq}=C_4+C_2=(4+6)\mu F$$

ومنه سعة المكثفة المكافئة للدارة هي:

$$C_{eq}=10\mu F$$

الطاقة الكهربائية لمكتفة

الطاقة الكهروستاتيكية لمكثفة مكونة من ناقلين A و B معزولين وشحنتهما Q_A و Q_B على الترتيب وكمونهما V_A و V_B إذا:

$$|Q_A| = |Q_B| = Q\ ,\ \ V = V_B - V_A$$

$$E_p = \frac{1}{2}(V_A Q_A + V_B Q_B) = \frac{1}{2}Q(V_B - V_A) = \frac{1}{2}QV$$

تختزن المكثفة طاقة كهربائية، تساوي هذه الطاقة العمل الواجب بذله لشحن المكثفة.

تطبيق:

نعتبر مكثفتين ذاتي سعتي $C_1 = 6\mu F$ و $C_2 = 3\mu F$ وفرق الكمون بين طرفيهما $V = 18V$

1-احسب سعة المكثفة المكافئة وشحنة كل مكثفة وفرق الكمون بين طرفي كل مكثفة وهذا في الحالتين :

ا- الربط على التسلسل. ب- الربط على التفرع

الحل:

ا- حالة الربط على التسلسل:

- سعة المكثفة المكافئة:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{6} + \frac{1}{3} = \frac{1}{2} \Rightarrow C_{eq} = 2\mu F$$

- شحنة كل مكثفة: بما ان الربط على التسلسل فان الشحنات نفسها:

$$Q_{eq} = Q_1 = Q_2 = C_{eq}V = 2.18 = 36\mu C$$

- فرق الكمون بين طرفي المكثفة 1:

$$V_1 = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{36}{6} = 6V$$

- فرق الكمون بين طرفي المكثفة 2:

$$V_2 = \frac{Q_2}{C_2} = \frac{36}{3} = 12V$$

ا- حالة الربط على التفرع:

- سعة المكثفة المكافئة:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 = 6 + 3 = 9\mu F$$

- فرق الكمون بين طرفي المكثفة 1 والمكثفة 2: بما ان الربط على التفرع فان التوتر الكهربائي بين طرفي كل مكثفة هو نفسه:

$$V_1 = V_2 = V = 18V$$

- شحنة كل مكثفة 1:

$$Q_1 = C_1 V_1 = 6.18 = 108\mu C$$

- شحنة كل مكثفة 2:

$$Q_2 = C_2 V_2 = 3.18 = 54\mu C$$

لاحظ ان سعة المكثفة المكافئة في حالة الربط على التسلسل أصغر من كل من C_1 و C_2، في حين ان سعتها في حالة الربط على التفرع أكبر من كل من C_1 و C_2.