الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

ر. الترتيب:

ر. التسلسل:

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة قاصدي مرباح ورقـــــــلة

كلية الرياضيات و علوم المادة

قسم: الفيـــــــــــزياء

مذكرة تخرج تدخل ضمن متطلبات نيل شهادة الماستر أكاديمي في الفيزياء

تخصص: فيزياء الاشعـــاعات

إعداد الطالبيْن: بن الشيخ حاج مبروك و بن الشيخ عادل

بعنوان:

تصميم عملي لنموذج محول كهربائي سعوي ودراسة مميزاته التحويلية (الجهد والطاقة) باستخدام قوانين الشبكات والنظرية الكهرومغناطيسية

نوقشت يوم: 2019/07/07 أمام لجنة المناقشة المكوّنة من:

الأستاذ	الدرجة	الجامعة	الصفة
خلفاوي فتحي	أستاذ تعليم عالٍ	ورقلة	رئيسًا
بن طويلة عمر	أستاذ محاضر	ورقلة	مناقشاً
بن حميدة سفيان	أستاذ محاضر	ورقلة	مناقشاً
شيحي إسماعيل	أستاذ تعليم عالٍ	ورقلة	مقـرِّراً

2019\2018

بسم الله الرحمن الرحيم

تشكـــــــر

إن أول ما نفتح به بحثنا هو **الحمد لله الذي هدانا لهذا و ما كنا لنهتدي لولا أن هدانا الله**، و الثناء عليه لفيض نعمه و جليل عطائه و هدايته لنا إلى نور الإسلام و ضياء العلم و المعرفة.

مصداقا لقوله **صلى الله عليه و سلم**: "**من لم يشكر الناس لم يشكر الله، و من أسدى إليكم معروفا فكافئوه فإن لم تستطيعوا فادعوا له**"، فإننا نتقدم بفائق الشكر و التقدير و الاحترام إلى أعضاء لجنة المناقشة: الأستاذ خلفاوي فتحـــــي، على قبوله ترؤسها، والأستاذين: بن طويلة عمر و بن حميدة سفيان على تشريفهما لنا بقبول المشاركة فيها، وهذا ما يُعطي لعملنا قيمة أكبر.

نخص بالشكـــــر الجزيـــــل والتقدير الوفيـــــر من علّمنا، و كان سنـــــداً و عـــوناً لنا في إعـــداد هذه المذكـــرة: الأستاذ الدكتور شيحـــي إسماعيل فـــجزاه **الله** عنا خير الجـــــــــــــــــــــزاء.

كما يتوجب علينا تقديم الشكر و العـــرفان و الامتنان إلى الذين حملوا أقدس رسالة في الحياة، أساتذتنا في كل الأطوار، وخاصـــة أساتذة كلية الرياضيات وعلوم المادة في جامعة ورقلة.

نتوجه كذلك بتشكراتنا العميقـــة إلى القائميـــــن على مخـــبـــر فيزياء الاشعاع والبلازما وفيزياء السطوح **LRPPS** بجامـــــعة ورقـــــلة وخاصة تقني المخبر المحتـرم حـــوتي أحمـد، نظير ما قدموه لنا من تسهيلات لإنجاح هذا العمل.

لابد لنـــا – ونحـن في مهنة التعليم – من وقفة نَذكُر فيها زمـــلائنا، الذين قدموا جهودا كبيرة في بناء جيل الغد، لبعث الأمة من جديد، كي نتقدم لهم بأسمى عبارات الشكر و الامتنان و المحبة.

لا يفوتنا أيضا تقديـم المـــحبة و الاحتـــرام إلى زملائنـــا في الدراســـة بجامعـــة ورقلـــة تخصـــص فيزيـــاء الأشعـــة، وخاصة الزميلتين: مدقن أمال و صخر العلمية.

فهرس المحتويات

تشكـــــــــــر /

قائمة الأشكـــــــال /

قائمة الجـــــــداول /

مقـــــــــدمة عامة 1

الفصل الأول: عموميات عن المحولات الكهربائية

I. العناصر الكهربائية الناقلة الخاملة 3

1.1 الناقل الأومي 4

أ) تعريف الناقل الأومي 4

ب) سلوك الناقل الأومي في الكهرباء الساكنة 4

ت) سلوك الناقل الأومي في الكهرباء المتحركة 5

2.1 المكثفة 6

أ) تعريف المكثفة 6

ب) سلوك المكثفة في الكهرباء الساكنة 7

ت) سلوك المكثفة في الكهرباء المتحركة 8

3.1 الوشيعة 9

أ) تعريف الوشيعة 9

ب) سلوك الوشيعة في الكهرباء الساكنة 11

ت) سلوك الوشيعة في الكهرباء المتحركة 11

II. الطاقة المخزنة والطاقة المحولة في العناصر الكهربائية 12

1.2 نظرية بوينتينغ للطاقة 12

2.2 تطبيق نظرية بوينتينغ على ناقل أومي 14

3.2 تطبيق نظرية بوينتينغ على المكثفة 15

4.2 تطبيق نظرية بوينتينغ على الوشيعة 17

III. الدراسة الطاقوية للمحولات الحثية 19

1.3 تعريف المحول الحثي 19

2.3 نسبة الجهد المحولة للحمولة في المحول الحثي 19

3.3 المردود الطاقوي للمحول الحثي 21

4.3 المحولات الحثية الحقيقية 22

5.3 مزايا المحولات الحثية ونقائصها 24

الفصل الثاني: الحسابات النظرية للمحولات السعوية

I. بنية المحولات السعوية 25
II. الدراسة النظرية باستعمال قوانين الشبكات 26
1.2 النسبة المحولة للجهد في المحول السعوي 26
2.2 المردود الطاقوي للمحول السعوي 27
III. الدراسة النظرية باستعمال نظرية بوينتينغ للطاقة 28
1.3 نسبة الجهد المحولة 28
2.3 المردود الطاقوي للمحول السعوي 30
IV. تغيرات نسبة الجهد المحولة في المحول السعوي بدلالة تواتر المولد ومقاومة الحمولة 31
1.4 بدلالة مقاومة الحمولة 31
2.4 بدلالة تواتر المولد 31
V. تغيرات المردود الطاقوي للمحول السعوي بدلالة تواتر المولد ومقاومة الحمولة 32
1.5 بدلالة مقاومة الحمولة 32
2.5 بدلالة تواتر المولد 33

الفصل الثالث: الدراسة التجريبية للمحولات السعوية

I. المحولات السعوي الفراغية 35
1.1 الأدوات المستعملة 35
2.1 تغيرات نسبة الجهد المحولة والمردود الطاقوي للمحول السعوي الفراغي بدلالة توتر المولد 38
3.1 تغيرات نسبة الجهد المحولة والمردود الطاقوي للمحول السعوي الفراغي بدلالة مقاومة الحمولة 41
II. المحولات السعوية ذات عازل رملي (المحولات السعوية الرملية) 42
1.2 تحضير عينة الرمل 42
2.2 انجاز مكثفة ذات عازل رملي 44
3.2 قياس الخصائص الكهربائية للرمل 44
أ) قياس سعة المكثفة واستنباط قيمة السماحية 44
ب) المقاومية الكهربائية للرمل 45
4.2 تأثير الرمل على تغيرات نسبة تحويل الجهد والمردود الطاقوي للمحول السعوي 46
5.2 تأثير استعمال الرمل على النسبة المحولة العظمى والمردود الطاقوي الأعظمي 50

الفصل الرابع: تحليل النتائج التجريبية ومقارنتها مع النظرية

I. المحول السعوي الفراغية. 52

II. المحولات السعوية الرملية 53

1.2 استعمال الرمل S_3 كعازل رملي للمكثفة C_3 53

أ) المقاومية الكهربائية للرمل S_3 53

ب) ثابت العزل الكهربائي للرمل S_3 54

2.2 استعمال الرمل S_3 كعازل رملي للمكثفة C'_3، والرمل S_2 كعازل رملي للمكثفة C'_2 57

أ) المقاومية الكهربائية للرمل S_2 57

ب) ثابت العزل الكهربائي للرمل S_2 57

خلاصـــــــــــة عامة 60

المراجـــــــــع 61

قائمة الأشكـــــال /

قائمة الجـــــداول /

المختصـــــر

قائمة الأشكال

الفصل الأول: عموميات عن المحولات الكهربائية

الشكل (1.1) سلك ناقل ذو شكل أسطواني **4**

الشكل (2.1) تأثر ناقل بحقل كهربائي خارجي **5**

الشكل (3.1) مرور تيار كهربائي في ناقل **5**

الشكل (4.1) بنية المكثفة **6**

الشكل (5.1) شحن مكثفة عند اختلاف الكمون بين لبوسيها **7**

الشكل (6.1) بنية الحقل الكهربائي في عازل مكثفة أسطوانية **8**

الشكل (7.1) دارة شحن مكثفة بتيار مستمر **8**

الشكل (8.1) بنية الوشيعة الطويلة والمسطحة **9**

الشكل (9.1) خطوط الحقل المغناطيسي في وشيعة طويلة **10**

الشكل (10.1) بنية الحقلين الكهربائي والمغناطيسي في ناقل اومي **15**

الشكل (11.1) بنية الحقلين الكهربائي والمغناطيسي في مكثفة **16**

الشكل (12.1) بنية الحقلين الكهربائي والمغناطيسي في وشيعة **18**

الشكل (13.1) محول كهربائي حثي **19**

الشكل (14.1) توصيل المحول الكهربائي الحثي بالمولد والحمولة **20**

الشكل (15.1) تسرب الفيض المغناطيسي من الملفين الابتدائي الثانوي **23**

الشكل (16.1) التيارات الدوامية الناشئة في قطعة حديد قريبة من وشيعة **23**

الشكل (17.1) منحنى استجابة النواة الحديدية للمغنطة الخارجية **24**

الفصل الثاني: الحسابات النظرية للمحولات السعّوية

الشكل (1.2) بنية المحول السعوي المنجز **25**

الشكل (2.2) الدارة الكهربائية المنمذجة للمحول السعوي **26**

الشكل (3.2) تساوي شحنتي مكثفتين على التسلسل حسب مبدأ انحفاظ الشحنة **29**

الشكل (4.2) تغير نسبة الجهد المحولة بدلالة مقاومة الحمولة **31**

الشكل (5.2) تغير نسبة الجهد المحولة بدلالة تواتر المولد **31**

الشكل (6.2) تغير نسبة الجهد المحولة بدلالة مقاومة الحمولة وتواتر المولد **32**

الشكل (7.2) تغير المردود الطاقوي بدلالة مقاومة الحمولة **32**

الشكل (8.2) تغير المردود الطاقوي بدلالة تواتر المولد **33**

الشكل (9.2) تغير المردود الطاقوي بدلالة مقاومة الحمولة وتواتر المولد **33**

الشكل (10.2) تغير نسبة الجهد المحولة والمردود الطاقوي العظميين بدلالة سعة المكثفة C_1 **34**

الشكل (11.2) تغير نسبة الجهد المحولة والمردود الطاقوي العظميين بدلالة سعة المكثفة C_2 **34**

الشكل (12.2) تغير نسبة الجهد المحولة والمردود الطاقوي العظميين بدلالة سعة المكثفة C_3 **34**

الفصل الثالث: الدراسة التجريبية للمحولات السعوية

الشكل(1.3) صورة جانبية للمحول السعوي **35**

الشكل(2.3) صورة للجزء العلوي للمحول السعوي المنجز **35**

الشكل(3.3) مولد التواترات المنخفضة المستعمل في الدراسة **36**

الشكل(4.3) ناقل أومي ذو مقاومة متغيرة **36**

الشكل(5.3) راسم الاهتزاز المهبطي المستعمل في قياس التوترات **36**

الشكل(6.3) جهاز الامبير متر **37**

الشكل(7.3) جهازين متعددي القياسات **37**

الشكل(8.3) التركيب التجريبي المنجز لقياس نسبة الجهد والمردود الطاقوي المحولين للحمولة **38**

الشكل(9.3) الدارة الكهربائية المنمذجة للمحول السعوي **39**

الشكل(10.3) القيم التجريبية والمنحنى النظري لنسبة الجهد المحولة بدلالة تواتر المولد **40**

الشكل(11.3) القيم التجريبية والمنحنى النظري للمردود الطاقوي بدلالة تواتر المولد **40**

الشكل(12.3) القيم التجريبية والمنحنى النظري لنسبة الجهد المحولة بدلالة مقاومة الحمولة **41**

الشكل(13.3) القيم التجريبية والمنحنى النظري للمردود الطاقوي بدلالة مقاومة الحمولة **42**

الشكل(14.3) الجهاز المستعمل في سحق عينة الرمل **42**

الشكل(15.3) الجهاز المستعمل في غربلة مسحوق الرمل **43**

الشكل(16.3) عينات الرمل المستخلصة من غربلة الرمل **43**

الشكل(17.3) النتائج النظرية والتجريبية لتغيرات نسبة الجهد المحولة بدلالة مقاومة الحمولة بعد استعمال الرمل S_3 **46**

الشكل(18.3) النتائج النظرية والتجريبية لتغيرات المردود الطاقوي بدلالة مقاومة الحمولة بعد استعمال الرمل S_3 **47**

الشكل(19.3) النتائج النظرية والتجريبية لتغيرات النسبة المحولة للجهد بدلالة تواتر المولد بعد استعمال الرمل S_3 **48**

الشكل(20.3) النتائج النظرية والتجريبية لتغيرات المردود الطاقوي بدلالة تواتر المولد بعد استعمال الرمل S_3 **48**

الشكل(21.3) النتائج النظرية والتجريبية لتغيرات النسبة المحولة بدلالة تواتر المولد بعد استعمال الرمل S_3وS_2 **49**

الشكل(22.3) النتائج النظرية والتجريبية لتغيرات المردود الطاقوي بدلالة تواتر المولد بعد استعمال الرمل S_3 وS_2. **49**

الشكل(23.3) تغيرات النسبة المحولة بدلالة مقاومة الحمولة قبل وبعد استعمال الرمل كعازل للمكثفات **50**

الشكل(24.3) تغيرات المردود الطاقوي بدلالة مقاومة الحمولة قبل وبعد استعمال الرمل كعازل للمكثفات **51**

الفصل الرابع: تحليل النتائج التجريبية ومقارنتها مع النظرية

الشكل (1.4) تغيرات نسبة الجهد المحولة والمردود الطاقوي العظميين بدلالة سعة مكثفات التركيب **52**

الشكل (2.4) تغيرات ثابت العزل الكهربائي للرمل S_3 بدلالة تواتر الحقول الكهرومغناطيسية **56**

الشكل(25.3) تغيرات ثابتي العزل الكهربائي للرملين S_3 و S_2 بدلالة تواتر المولد **59**

قائمة الجداول

الفصل الأول: عموميات عن المحولات الكهربائية

الجدول (1.1) المقاومية النوعية لبعض المواد **4**

الجدول (2.1) سعة المكثفة تبعا لهندستها **7**

الجدول (3.1) ذاتية الوشيعة تبعا لهندستها **10**

الجدول (4.1) ذاتية الوشيعة المكافئة **11**

الفصل الثاني: الحسابات النظرية للمحولات السعوية

الجدول (1.2) سعة مكثفات المحول السعوي المنجز **25**

الفصل الثالث: الدراسة التجريبية للمحولات السعوية

الجدول(1.3) القيم النظرية التجريبية لسعة مكثفات المحول السعوي المنجز **38**

الجدول(2.3) قيم الجهود والتيارات المقاسة والنسبة المحولة والمردود الطاقوي المحسوبتين عند تواترات مختلفة للمولد **39**

الجدول(3.3) قيم الجهود والتيارات المقاسة والنسبة المحولة والمردود الطاقوي المحسوبتين عند مقاومات مختلفة للحمولة **41**

الجدول(4.3) قيمة سعة المكثفة 3 قبل وبعد استعمال الرمل S_3 **44**

الجدول(5.3) قيمة سعة المكثفة 2 قبل وبعد استعمال الرمل S_2 **44**

الجدول(6.3) قيمة المقاومة المستعملة على التوازي مع الرمل S_3 والمقاومة المكافئة **45**

الجدول(7.3) قيمة المقاومة المستعملة على التوازي مع الرمل S_2 والمقاومة المكافئة **45**

الفصل الرابع: تحليل النتائج التجريبية ومقارنتها مع النظرية

الجدول (1.4) المقاومية الكهربائية لأغلب مكونات الرمل **53**

الجدول (2.4) القيم التجريبية لنسبة الجهد المحولة والمردود الطاقوي عند كل تواتر للمولد بعد استعمال الرمل S_3 **54**

الجدول (3.4) حساب القيم التجريبية لثابت العزل ε_3من القيم التجريبية لنسبة الجهد المحولة والمردود الطاقوي بعد استعمال الرمل S_3 **56**

الجدول (4.4) قيم ثابت عزلε_2 التجريبية محسوب انطلاقا من القيم التجريبية لنسبة المحولة بعد استعمال الرملين S_3 و S_2 **58**

الجدول (5.4) ثابت العزل لأغلب مكونات الرمل **59**

مقدمة

مقدمـــــــــــــــــــة:

تُعتبر محولات الطاقة الكهربائية من بين أهم العناصر الكهربائية المستعملة في دوائر التيار المتناوب، فهي توظف لرفع الجهد أو خفضه، و أغلبها يُعتمد في صناعته على الوشائع وفق فعْلِ التحريض (الحث) الكهرومغناطيسي، لأنها تخزن الطاقة في الحقول المغناطيسية.

رُغم كفاءة هذا النوع من المحولات في نقل الطاقة داخل الشبكات الكهربائية وتوزيعها إلا أن لها جملةَ من النقائص، نذكر منها: الفقْد الحراري، الضجيج، التيارات الدوّامية...إلخ، أدت بنا إلى التفكير في هذا العمل، وذلك باستبدال الوشائع بالمكثفات التي تعتمد على تخزين الطاقة في الحقول الكهربائية.

تُدعى هذه المحولات "المحوّلات السعوية"، وهي معروفة منذ أكثر من قرنٍ من الزمان، إلا أنها تقنية منسيةٌ. تتميّز هذه المحوّلات بمميّزات نذكر منها: انعدام ضياعات الطاقة، عدم وجود ضجيج أو تحريض بها، عدم وجود حمل وهمي بها (Phantom load)، ذات تكلفة رخيصة، سهولة تصميمها وتركيبها لاختيار نسب تحويل الجهد المرغوب بها، عدم تضررها بالدوائر المستقصرة (court-circuit). ولربما الأهم من كل ذلك عدم وجود براءات اختراع لتكنولوجيا تزويد الطاقة باستخدام المحولات السعوية (Capacity Power Supply)، والتي يُرمز لها اختصارًا (CPS)، فهي مجال عامٌّ يمكن لأيِّ شخص إنشاؤها واستخدامها.

رُغم أنه يمكن استخدام هذه التكنولوجيا لاستبدال كافة المحوّلات الخافضة تقريبًا، إلا أنها لا تقضي تماما على المحولات الحثّية ذات الكفاءة الأقل، الصاخبة، الساخنة والثقيلة؛ ذلك أنه لا يمكن استخدام المحوّلات السعوية لزيادة الجهد، إلا أنه من جهة أخرى لا تزال هناك مليارات من تطبيقات خفض الجهد التي يمكنها استخدام هذه التكنولوجيا البسيطة والفعالة للغاية.

نسعى في هذا العمل إلى إنجاز محوّل كهربائي سعوي مؤلف من ثلاث مكثفات موصولة مع بعضها على التسلسل، ثم تُغذى الجملة كلّها بجهد متناوب، ثم يؤخذ جهد المخرج بين طرفي المكثفة الوسطى، فتكون جملة المخرج معزولةً شحنيًا تمامًا عن جملة المدخل.

لكلّ ذلك كان من المناسب جدا عَنْوَنَةُ مذكرتنا هذه بـ: "تصميمٌ عملي لنموذجِ محوِّل كهربائي سِعَوي، و دراسة مميزاته التحويلية للجهد و الطاقة"؛ إذْ نحاول خلالها حساب نسبة الجهد المحوّلة و المردود الطاقوي و علاقتهما بسعات المكثفات، و كذا بترددات منبع التغذية و المقاومة الكهربائية للحمل المتصل بجملة المخرج. كل ذلك باعتماد طريقتيْ حساب هما: قوانين الشبكات الكهربائية و قوانين النظرية الكهرومغناطيسية. بعدَ ذلك تُجرى القياسات التجريبية، وتُقارن بنظيراتها النظرية، و من ثَمّ مناقشة مدى تطابق النتائج التجريبية مع النتائج النظرية.

تتألف هذه المذكرة من مقدمة و أربعة فصول و خلاصة.

الفصل الأول: عموميات عن المحولات الكهربائية، عرّفنا فيه العناصر الكهربائية الأساسية للدارات الكهربائية، كالناقل الأومي و المكثفة و الوشيعة، و كذا سلوك كل منها في الكهرباء الساكنة و الكهرباء المتحركة المستمرة و المتناوبة. كما تحدّثنا عن الطاقة المختزنة، المحوَّلة أو المتبددة في هذه العناصر، وذلك وفق نظرية بوينتينغ (Poynting) للطاقة الكهرومغناطيسية، و من ثَمَّ حساب نسبة الجهد المحوَّلة و كذا المردود الطاقوي في المحولات الحثية.

الفصل الثاني: الحسابات النظرية للمحولات الكهربائية السعوية، نسعى فيه إلى دراسة محول كهربائي سعوي: بُنيته وخواصه وكيفية تغيرات نسبته المحوّلة ومردوده الطاقوي بدلالة كل من مقاومة الحمولة المتمثلة في ناقل أومي وتواتر مولد المنبع.

الفصل الثالث: الدراسة التجريبية للمحول الكهربائي السعوي، حاولنا إنجاز نموذجٍ لمحوّل كهربائي سعوي، تُشكل فيه المكثفات من أنابيب نحاسية متمحورة ذات أقطار متفاوتة، ثم إيجاد كفاءة هذا المحوّل من خلال قياس النسبة المحوّلة للجهد والمردود الطاقوي، وكيفية تأثّرهما بمقاومة الحمولة وتردد المنبع. في هذه الدراسة التجريبية سنستخدم أساسًا الهواءَ عازلا بين لبوسات المكثفات، ثُم نستخدم رمل الكثبان المطحون بدلَ الهواء، وذلك بقصد التعرّف على بعض الخواص الكهربائية للرمل.

الفصل الرابع: تحليل النتائج التجريبية ومقارنتها مع النظرية، وضعنا به مقارنات بين النتائج التجريبية والدراسة النظرية، محاولين تفسير وتبرير أَوْجُهِ الاتفاق والاختلاف بينهما، واستخلاص بعض النتائج ومقارنتها بنتائج دراسات سابقة.

الخلاصة: نُحوصِل فيها أهمّ الخطوات النظرية والتجريبية، والتعرض لمدى كفاءة المحول الكهربائي السعوي الذي صمّمناه بقصد تجاوز عيوب المحولات الحثية، كما نعرض فيها الآفاق المستقبلية لاستغلال مثل هذه المحولات.

الفصل الأول

عموميات عن المحولات الكهربائية

الفصل الأول :عموميات عن المحولات الكهربائية

تمهيـــــــــــد:

تصنف العناصر المكونة للدارات الكهربائية حسب دورها الطاقوي إلى صنفين[7]:

أ) عناصـــــر فعالـــــة:

هي العناصر التي لها القدرة على تقديم الطاقة الكهربائية لمكونات الدارة، و ذلك بتحويلها أحد أشكال الطاقة الأخرى إلى طاقة كهربائية، كالمولدات (تحويل الطاقة الحركية إلى طاقة كهربائية)، و البطاريات (تحويل الطاقة الكيميائية إلى كهربائية)، الألواح الشمسية (تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية)[8].

ب) عناصـــــر خاملـــــة:

هي العناصر التي تحول الطاقة الكهربائية التي تكتسبها من المكونات الفعالة للدارة إلى مكونات أخرى أو تبددها في أحد أشكال الطاقة الأخرى، كالناقل الأومي، و المكثفة، و الوشيعة، و الديود... الخ[7].

إن المفهوم العام للمحول الكهربائي لا يقتصر على المحولات الحثية، بل يشمل كل عنصر يحوّل الطاقة الكهربائية التي يكتسبها من مكون داخل الدارة إلى مكون آخرَ، فالمحول الكهربائي إذن لا يحوي عناصرَ فعّالة، و إنما يتشكل من عنصر كهربائي خامل أو أكثر[1]. فماهي الخواص الطاقوية للعناصر الكهربائية الخاملة، و التي تؤهلها لتشكيل محولات كهربائية؟

I. العناصـــــــر الكهربائيـــة الخاملـــة:

تصنف المواد الموجودة في الطبيعة من ناحية سلوكها الكهربائي إلى ثلاثة أصناف[2]:

أ) مـــواد ناقلـــة:

هي المواد التي تمتلك جسيمات مشحونة حرة الحركة في درجة حرارة الغرفة، مثل الحديد، النحاس، الألومنيوم، المحاليل الشاردية... الخ.

ب) مـــواد عازلـــة:

هي المواد التي لا تملك شحنًا حرة الحركة، أو أن حركتها تكون في نطاق ضيق، وذلك لارتباط هذه الشحن بقوى كبيرة مع النواة، مثل الخشب، البلاستيك، الزجاج، المحاليل الجزيئية... الخ.

ج) مـــواد شبه ناقلـــة:

هي المواد التي تتصف بالحالة المتوسطة بين المواد الناقلة والعازلة، إذ أنها تسمح بحركة الشحن عند معالجتها صناعيا، ومن أشهر هذه المواد الجرمانيوم و السليسيوم.

تُمكِن هذه الأصناف الثلاثة من إنشاء عدة عناصر كهربائية خاملة من بينها:

1.1 الناقل الأومي:

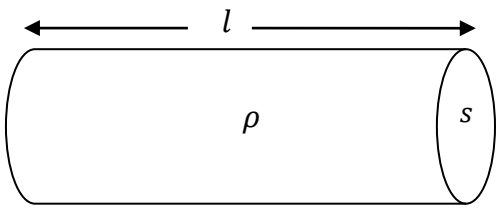
أ) تعريـــف الناقل الأومي:

هو كل ناقل كهربائي يخضع لقانون أوم الذي ينص على[8]:

$$\Delta V = V_1 - V_2 = RI \quad (1.1)$$

حيث ΔV فرق الكمون بين طرفي الناقل، I شدة التيار الكهربائي الذي يجتاز الناقل، و R المقاومة الكهربائية، و هي مقدار مميز للناقل، يعبّر عن إعاقة حركة الإلكترونات الحرة داخله، و قد أثبتت التجارب أن عبارتها في سلك أسطواني، الشكل (1.1) هي[2][8][9]:

$$R = \frac{\rho l}{s} \quad (2.1)$$



الشكل (1.1): سلك ناقل ذو شكل أسطواني.

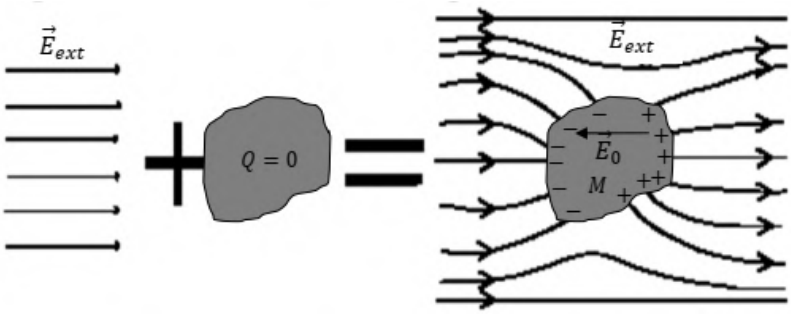
حيث l طول الناقل، s مساحة مقطع الناقل و ρ المقاومية أو المقاومة النوعية، و تتعلق بنوع مادة الناقل. يعطِي الجدول (1.1) قيم المقاومية لبعض المواد في درجة حرارة الغرفة.

الجدول (1.1): المقاومة النوعية لبعض المواد[2].

المادة	المقاومية $(\Omega.m)$
الكربون	3.5×10^{-5}
النحاس	1.7×10^{-8}
الحديد	10^{-7}
الرمل	10^{16}

ب) سلوك الناقل في الكهرباء الساكنة:

يحوي الناقل المتعادل كهربائيا إلكترونات حرة، و عندما يوضع في حقل كهربائي $\vec{E}_{ex}$ فإن هذه الإلكترونات تنتقل في اتجاه معاكس للحقل $\vec{E}_{ex}$، و يظهر على طرفي الناقل شحنات موجبة و سالبة بكميات متساوية، كما في الشكل (2.1)، فينشأ عن هذا التوزيع الجديد للشحنات حقل كهربائي داخلي $\vec{E}_0$ معاكس للحقل $\vec{E}_{ex}$ [2][8][9].



الشكل (2.1): تأثر ناقل بحقل كهربائي خارجي[2].

حين يبلغُ الناقل حالةَ الاتزان الكهروستاتيكي، يكون مجموع الحقلين $\vec{E}_{ex}$ و $\vec{E}_0$ معدومًا في أي نقطة من الناقل، و بالتالي تكون محصلة القوى المؤثرة على أي شحنة معدومةً، فتسكن الشحن في مواضعها.

ج) سلوك الناقل في الكهرباء المتحركة:

التيار الكهربائي المستمر:

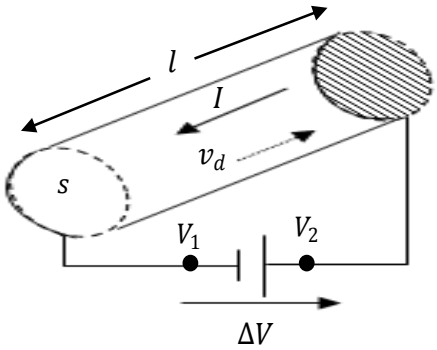
تعرف شدة التيار الكهربائي I على أنها كمية الكهرباء dQ المارة عبر مقطع S خلال الفترة الزمنية dt، و نكتب:

$$I = \frac{dQ}{dt} = n.e.v_d.s \quad (3.1)$$

حيث n كثافة الإلكترونات الحرة في الناقل، e الشحنة الكهربائية للإلكترون، v_d سرعة الانجراف الإلكترونية، و هي متوسط سرعات الإلكترونات المسؤولة عن التيار.

في النظام المستقر، والذي يكون فيه كمون نقطة ما من الناقل ثابتا مع الزمن كما في الشكل (3.1)، يؤدي اختلاف الكمون $\Delta V = V_2 - V_1$ بين نقطتين من الناقل إلى نشوء حقل كهربائي $\vec{E}$ يؤثر على الإلكترونات بقوة تجعلها تتحرك نحو الكمون المرتفع، و ينتج عن ذلك تيار كهربائي I يمرُّ عبر المقطع (يكون اصطلاحًا بعكس اتجاه حركة الإلكترونات)، ذو شدة ثابتة تعطى بالعلاقة التالية[2]:

$$I = \frac{s}{\rho}E \quad (4.1)$$



الشكل (3.1): مرور تيار كهربائي في ناقل

عند حساب فرق الكمون ΔV على اعتبار أنه تجول الحقل الكهربائي $\vec{E}$ على طول الناقل نتأكد من قانون أوم السابق:

$$\Delta V = \int_0^l \vec{E}\,\vec{dl} = \frac{\rho I}{s} l = RI \quad (5.1)$$

التيار الكهربائي المتناوب:

عندما يكون فرق الكمون بين نقطتين من ناقل متغيرا بشكل دوري مع الزمن وفقًا للعلاقة:

$$\Delta V = V_0 \cos(\omega t + \phi) \quad (6.1)$$

فإنه من الواضح أن الحقل الكهربائي الناشئ داخله يتغير جهة وشدة بشكل دوري أيضا، و هذا ما يؤدي إلى حركة اهتزازية للإلكترونات الحرة داخل الناقل ذهابا و إيابا، و ينتج عن ذلك تغيّر شدة التيار المارة عبر المقطع مع الزمن وفقًا للعلاقة[8][10]:

$$I = I_0 \cos(\omega t + \phi) \quad (7.1)$$

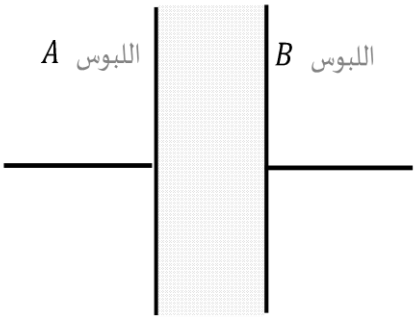
و بذلك يبقى فرق الكمون بين طرفي الناقل الأومي محافظا على العلاقة:

$$\Delta V = RI \quad (8.1)$$

2.1 المكثفة:

أ) تعريف المكثفة:

هي جملة ناقلين (لبوسيْن) يتبادلان التأثير فيما بينهما، الشكل (4.1)، و قد يفصل بينهما عازل ذو سمك صغير مقارنة بأبعاد اللبوسين[2].



الشكل (4.1): بنية المكثفة

تكون المكثفة مشحونة عندما يحمل لبوساها شحنتين متساويتين مقدارًا و مختلفتين نوعًا حيث:

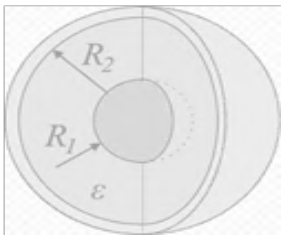
$$Q = |Q_A| = |Q_B| \quad (9.1)$$

تتميز المكثفة كما يظهر الجدول (2.1) بمقدار يتعلق بهندستها و طبيعة عازلها يسمى السعة الكهربائية C، و هي تميز مدى استيعاب المكثفة للشحنة عند كمون معيّن، و تُعطى قيمتها بالعلاقة:

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \quad (10.1)$$

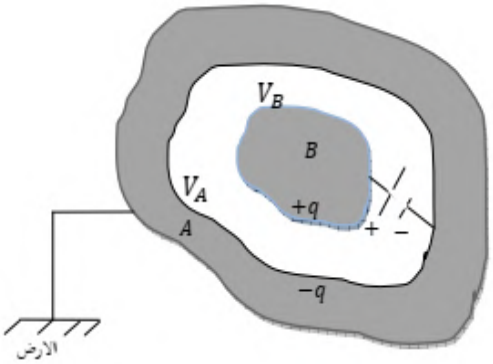
حيث Q شحنتها و ΔV فرق الكمون بين طرفيها.

الجدول (2.1): سعة المكثفة تبعا لهندستها[2].

المكثفة	الشكل	السعة
المستوية		$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d}$
الأسطوانية		$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{ln\left(\frac{b}{a}\right)}$
الكروية		$C = \frac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r R_1 R_2}{R_2 - R_1}$

ب) سلوك المكثفة في الكهرباء الساكنة:

عند توصيل لبوسي مكثفة بكمونيين مختلفين فرقهما $\Delta V = V_B - V_A$ ثابت باستعمال مولد مثلا فإن الإلكترونات الحرة للّبوس ذي الكمون الأعلى تهاجر عبر المولد إلى اللبوس ذي الكمون الأدنى كما هو موضَّح بالشكل (5.1)[2][8].



الشكل (5.1): شحن مكثفة عند اختلاف الكمون بين لبوسيها

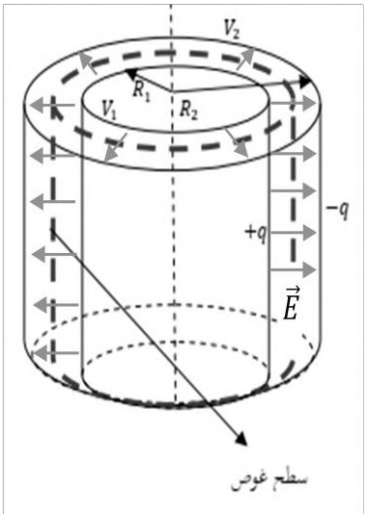
تستمر هذه الهجرة حتى تُصبح الجملة المكوَّنة من المولد و اللبوسين متوازنةً كهربائيا، عندئذ تتوقف هجرة الإلكترونات، و ينعدم التيار I في الدارة، كما تكون شحنة اللبوسين متساويةَ المقدار و مختلفةَ الإشارة[2][8].

يمكننا إيجاد عبارة الحقل الكهربائي في عازل المكثفة عندئذ باستعمال نظرية غاوس، و التي تنص على أن:

$$\oiint \vec{E}.d\vec{s} = \frac{Q}{\varepsilon} \quad (11.1)$$

فتكون عبارة الحقل الكهربائي في مكثفة أسطوانية الموضح في الشكل (6.1) كالتالي:

$$E = \frac{Q}{2\pi l r \varepsilon} \quad (12.1)$$



الشكل (6.1): بنية الحقل الكهربائي في عازل مكثفة أسطوانية

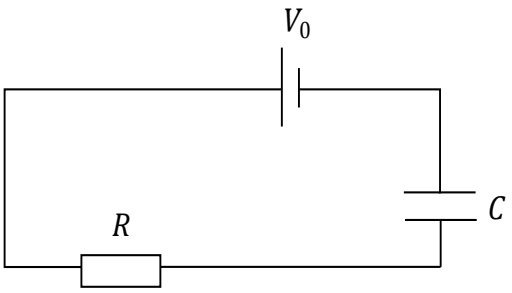
ج) سلوك المكثفة في الكهرباء المتحركة:

التيار الكهربائي المستمر:

المقصود بالتيار المستمر في مسألتنا هو التيار ذو الاتجاه الواحد، حتى و إن كان متغيرا مع الزمن، فعندما نخضع المكثفة إلى جهد مستمر كما في الدارة المبينة في الشكل (7.1) فإنها ستشحن باستمرار، و يزداد فرق الكمون بين لبوسيْها إلى أن يبلغَ قيمة حدّيةً مساويةً تماما للقوة الدافعة الكهربائية للمنبع V_0، و تكون عبارة فرق الكمون بين طرفي المكثفة عندئذ:

$$\Delta V = V_0\left(1 - e^{-t/(R.C)}\right) \quad (13.1)$$

حيث R المقاومة الكهربائية لمكونات الدارة، بما فيها المقاومة الداخلية للمنبع وكذا مقاومة التسرب للمكثفة، و C سعة المكثفة.



الشكل (7.1): دارة شحن مكثفة بتيار مستمر

فإذا ما بلغ فرق الكمون بين لبوسي المكثفة قيمةَ جهد انهيار المكثفة فإن عازلها سيتصرّف كناقل؛ أي أن شحنها الساكنة ستخضع لقوة كبيرة، تجعلها تخترق العازل بين اللبوسيْن، فتتلف عندئذ المكثفة[9][10].

التيار الكهربائي المتناوب:

عند توصيل لبوسي المكثفة بتوتر V متناوب فإن المكثفة ستُشحن و تُفرغ بصفة دورية مع الزمن، و تكون عبارة التوتر كما يلي:

$$V = V_0 cos(\omega t + \phi) \quad (14.1)$$

لتبسيط التحليل الرياضي للدارات الكهربائية نلجأ إلى التمثيل الأسي للتوتّرات و التيارات[8][9]، فتصبح العبارة السابقة من الشكل:

$$V = V_0 e^{j(wt+\phi)} \quad (15.1)$$

باستخدام العلاقتين (10.1) و (15.1) نتوصل إلى عبارة شدة التيار الكهربائي I المار في الدارة بدلالة التوتر V:

$$I = \frac{dQ}{dt} = C\frac{dV}{dt} = C\omega jV \quad (16.1)$$

عند العودة إلى قانون أوم (1.1) يمكننا ملاحظة أنه في حالة التيار الجيبي المتناوب فإن المكثفة تملك خاصية تشبه المقاومة في الناقل الأومي، يطلق عليها الممانعة، و تعرّف كالتالي[8][9]:

$$Z_C = \frac{V}{I} = \frac{1}{jC\omega} \quad (17.1)$$

3.1 الوشيـــعـــة:

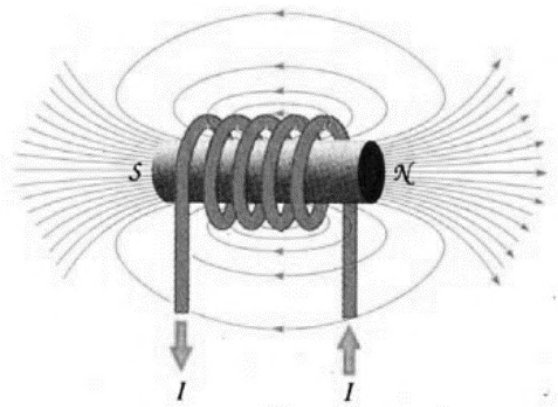
أ) تعريف الوشيعـــة:

تتشكّل الوشيعة من سلك معدني ناقل مطلي بمادة عازلة وملولب حول وسط مادي يدعى نواة الوشيعة[7][11]، كما في الشكل (8.1).

الشكل (8.1): وشيعة طويلة على اليمين و وشيعة مسطحة على اليسار

عندما يسري تيار كهربائي I في وشيعة طويلة طولها l و عدد لفاتها N تنشأ في نواتها ذات النفاذية المغناطيسية μ حقل مغناطيسي B الظاهر في الشكل (9.1) عبارته[7]:

$$B = \mu \frac{N}{l} I \quad (18.1)$$



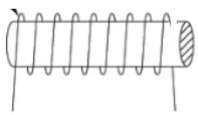
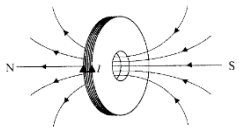
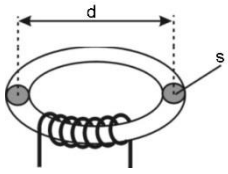
الشكل (9.1): خطوط الحقل المغناطيسي في وشيعة طويلة

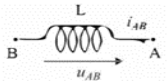
يمكننا قانون فاراداي–لانز للتحريض الكهرومغناطيسي من معرفة عبارة التوتر بين طرفي الوشيعة في حالة تغير تدفق الحقل المغناطيسي Φ عبر سطحها s:

$$V = \mathrm{N}\frac{d\Phi}{dt} = Ns\frac{dB}{dt} = \frac{\mu N^2 s}{l}\frac{dI}{dt} = L\frac{dI}{dt} \quad (19.1)$$

يتبين من خلال العبارة الأخيرة أن التوتر بين طرفي الوشيعة يتعلق بتغير شدة التيار المار عبرها ومقدار يسمى الذاتية L يميز هندستها ونوعية نواتها، عبارته من أجل وشائع مختلفة يوضحها الجدول (3.1):

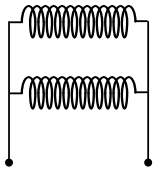
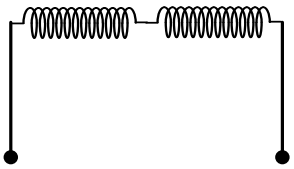
الجدول (3.1): ذاتية الوشيعة تبعا لهندستها [5].

الوشيعة	الشكل	الذاتية
الطويلة		$L = \frac{\mu N^2 s}{l}$
المسطحة		$L = \frac{\mu N^2 s}{R}$
الدائرية		$L = \frac{\mu N^2 s}{\pi d}$

يرمز للوشيعة في الدارات الكهربائية بالرمز: 

، و عند جمع وشيعتين تكون عبارة الذاتية المكافئة تبعا لطريقة الربط كالتالي:

الجدول (4.1): ذاتية الوشيعة المكافئة

الربط	على التوازي	على التسلسل
الشكل		
الذاتية المكافئة	$L_{eq} = \frac{L_1 . L_2}{L_1 + L_2}$	$L_{eq} = L_1 + L_2$

ب) سلوك الوشيعة في الكهرباء الساكنة:

إن التوتر بين طرفي وشيعة ينشأ عن تغير تدفق الحقل المغناطيسي عبر سطحها، و قد يكون هذا التغير ناتجا عن عامل خارجي كتحريك مغناطيس بجانبها مثلا، كما قد يكون ناتجا عن تغير شدة الحقل المغناطيسي المتولد من مرور تيار كهربائي فيها، و بما أن الكهرباء الساكنة تدرس الشحنات حالَ سكونها فإنه لا وجود لحقول مغناطيسية، و بالتالي لا دورَ للوشيعة في الكهرباء الساكنة.

ج) سلوك الوشيعة في الكهرباء المتحركة:

التيار الكهربائي المستمر:

عند مرور تيار كهربائي مستمر عبر وشيعة سيعمل على إنشاء حقل مغناطيسي ثابت الشدة و الجهة في كل موضع من الفضاء، و عليه فإن تدفق هذا الحقل المغناطيسي عبر سطحها سيكون ثابتًا مع الزمن، و هذا لن ينشئ أيَّ توتر بين طرفي الوشيعة[5]، إلا خلال فترة وجيزة بعد لحظة إغلاق الدارة أو فتحها.

التيار الكهربائي المتناوب:

عندما يسري تيار متناوب عبر الوشيعة فإنه سينشأ حقل مغناطيسي متغير الشدة و الجهة في كل موضع من الفضاء، و يكون تدفقه عبر سطح الوشيعة متغيرا مع الزمن، فمن أجل تيار كهربائي جيبي [8][9]:

$$I = I_0 e^{j(wt+\varphi)} \quad (20.1)$$

ينشأ توتر بين طرفي الوشيعة:

$$V = L\frac{dI}{dt} = jwLI_0 e^{j(wt+\varphi)} = jwLI \qquad (21.1)$$

تدل العبارة الأخيرة على أن الوشيعة عندما يجتازها تيار متناوب تمتلك ممانعة Z_L عبارتها[8][9]:

$$Z_L = \frac{V}{I} = jLw \quad (22.1)$$

II. الطاقة المختزنة و الطاقة المحوّلة في العناصر الكهربائية:

1.3 نظريــة بوينتينـــغ (Poynting) للطاقــة:

تمثل نظرية بوينتينغ للطاقة أحد نتائج المعالجات الرياضية لمعادلات ماكسويل للكهرومغناطيسية، وهي تتوافق مع مبدأ انحفاظ الطاقة[3][12][14][15].

إن الطاقة الكامنة الكهربائية لشحنة q موضوعة عند موضع M كمونه V تساوي قيمة العمل المبذول لنقل هذه الشحنة من اللانهاية إلى ذلك الموضع[2][3].

$$U_E = \int_{\infty}^{M} \vec{F}_{ext} . \overrightarrow{dl} = \int_{\infty}^{M} -q\vec{E} . \overrightarrow{dl} = q \int_{\infty}^{M} dV = qV_M \quad (23.1)$$

وبالتالي ستكون الطاقة الكهربائية لمجموعة n من الشحن

$$U_E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n} q_i V_i \quad (24.1)$$

في حالة توزيع شحني مستمر في حجم τ تكون عبارة الطاقة باعتبارها مختزنةً في الشحنات:

$$U_E = \frac{1}{2} \iiint_{\tau} V . dq \quad (25.1)$$

تقودنا المعالجة الرياضية للعلاقة (25.1) إلى عبارة الطاقة الكهربائية باعتبارها مختزنةً في الحقل الكهربائي[3]:

$$U_E = \frac{\varepsilon}{2} \iiint_{all\ space} E^2 d\tau \quad (26.1)$$

إذن فالكثافة الحجمية للطاقة المختزنة في الحقل الكهربائي هي

$$\Omega_E = \frac{dU}{d\tau} = \frac{\varepsilon}{2} E^2 \quad (27.1)$$

من جهة أخرى فإن الطاقة المغناطيسية لجملة شحن تتحرك في ناقل تساوي قيمة العمل المبذول ضد قوى التحريض الكهرومغناطيسي لجعل التيار يسري في الناقل[3]:

$$dU_B = Vdq = L\frac{dI}{dt} . I . dt = L . I . dI \quad (28.1)$$

بإجراء التكامل و تعميم هذه النتيجة على التيارات الحجمية تكون عبارة الطاقة المغناطيسية:

$$U_B = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}I\iint \vec{B}\,.\,d\vec{s} = \frac{1}{2}I\oint \vec{A}.\,d\vec{l} \quad (29.1)$$

حيث يمثل $\vec{A}$ الكمون الشعاعي المغناطيسي، و هو يتعلق بالحقل بالمغناطيسي $\vec{B}$ بالعلاقة:

$$\vec{B} = \overrightarrow{rot}(\vec{A}) \quad (30.1)$$

عند تحويل العلاقة (29.1) إلى تكامل حجمي عوضا عن تكامل خيطي تصبح من الشكل:

$$U_B = \frac{1}{2}\iiint_{\tau} \vec{A}.\vec{J}\,d\tau \quad (31.1)$$

تقودنا المعالجة الرياضية للعلاقة (31.1) إلى عبارة الطاقة المغناطيسية باعتبارها مختزنةً في الحقل المغناطيسي:

$$U_B = \frac{1}{2\mu}\iiint_{all\ space} B^2 d\tau \quad (32.1)$$

إذن فالكثافة الحجمية للطاقة المغناطيسية المختزنة في الحقل المغناطيسي هي:

$$\Omega_B = \frac{dU}{d\tau} = \frac{1}{2\mu}B^2 \quad (33.1)$$

بجمع العلاقتين (27.1) و (33.1) نتحصل على الكثافة الحجمية للطاقة المختزنة في الحقل الكهرومغناطيسي:

$$\Omega_{EB} = \frac{B^2}{2\mu} + \frac{\varepsilon E^2}{2} \quad (32.1)$$

لنستنبط الآن معادلة بوينتينغ من معادلات ماكسويل التالية:

$$\begin{cases} div\,\vec{E} = \dfrac{\rho}{\varepsilon} & (1) \\ div\,\vec{B} = 0 & (2) \end{cases} \begin{cases} \overrightarrow{rot}\vec{E} = -\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t} & (3) \\ \overrightarrow{rot}\vec{B} = \mu\vec{J} + \mu\varepsilon\dfrac{\partial \vec{E}}{\partial t} & (4) \end{cases} \quad (33.1)$$

بضرب المعادلة (4) من العلاقة (33.1) في $\vec{E}$ و المعادلة (3) في $\vec{B}$ و طرحهما طرفًا إلى طرف نجد:

$$\vec{B}.\overrightarrow{rot}\vec{E} - \vec{E}.\overrightarrow{rot}\vec{B} = -\vec{B}\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \mu\vec{E}\left(\vec{J} + \varepsilon\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\right) \quad (34.1)$$

بتبسيط العبارة الأخيرة و قسمتها على نفاذية الوسط μ نتحصل على:

$$div\left(\frac{\vec{E}\times\vec{B}}{\mu}\right)=-\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{B^2}{2\mu}\right)-\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\varepsilon E^2}{2}\right)-\vec{E}.\vec{J} \quad (35.1)$$

لِنُسمِّ متجه بوينتينغ $\vec{S}=\frac{\vec{E}\times\vec{B}}{\mu}$، و هو يمثّل الكثافة الحجمية للطاقة المتدفقة عبر وحدة السطوح خلال وحدة الأزمنة فنحصل على العلاقة المعبرة على نظرية بوينتينغ كما يلي:

$$div\vec{S}+\frac{\partial\Omega_{EM}}{\partial t}+\vec{E}.\vec{J}=0 \quad (36.1)$$

يمكن كتابة العلاقة (36.1) بصيغة تكاملية على النحو:

$$\frac{dU_{EB}}{dt}+\iiint\vec{E}.\vec{J}\,d\tau+\oiint\vec{S}.d\vec{s}=0 \quad (37.1)$$

تنص نظرية بوينتينغ على أنه عند أي موضع من الفضاء الكهرومغناطيسي يكون معدّل تغير الكثافة الحجمية للطاقة المختزنة في الحقول الكهرومغناطيسية مساويًا تمامًا مقدارَ الطاقة الكهرومغناطيسية المتدفقة مع الحقل لوحدة الحجوم عند ذلك الموضع (داخلةً إليه أو خارجةً منه)، مضافًا إليها مقدار الاستطاعة المتحولة بفعل جول الحراري لوحدة الحجوم عند الموضع نفسه. بعبارة أوجز، يمكننا القول: ما تدفّقت الطاقة الكهرومغناطيسية أو تحوّلت إلى حرارة عند موضع معيّنٍ إلا غَيَّرتْ كثافة الطاقة الكهرومغناطيسية عنده، زيادةً أو نقصانًا؛ إذِ الطاقةُ مقدارٌ محفوظٌ، مثلُها مثلُ الشحنة و الكتلة.

سنستعمل نظرية بوينتينغ فيما يلي لحساب الطاقة المختزنة و المحوّلة في العناصر الكهربائية الخاملة.

2.3 تطبيق نظرية بوينتينغ على الناقل الأومي:

لمعرفة كيفية توزع الطاقة المتدفقة من المنبع في الناقل الأومي نكتفي بحساب قيمة الحدود الثلاثة لنظرية بوينتينغ.

كما ورد في العلاقة (4.1) فإن عبارة الحقل الكهربائي في ناقل أومي أسطواني تكون بالشكل:

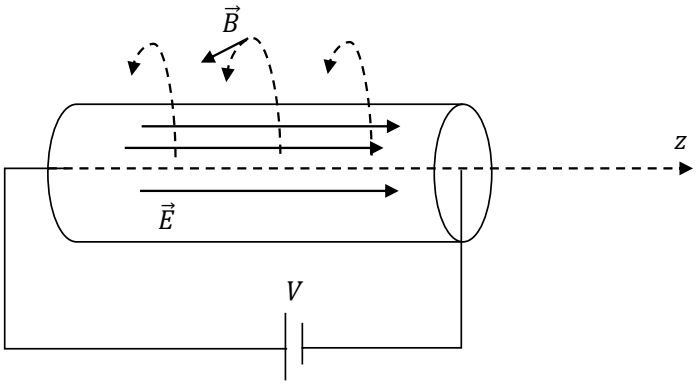
$$\vec{E}=\rho\vec{J}=\rho\frac{I}{s}\vec{e_z} \quad (38.1)$$

يمكننا إيجاد عبارة الحقل المغناطيسي المتولد عند نقطة تبعد r عن محور السلك باستخدام قانون آمبير الذي ينص على:

$$\oint\vec{B}.\vec{dl}=\mu I \quad (39.1)$$

تدلنا أصابع اليد اليمنى بأن الحقل المغناطيسي $\vec{B}$ يكون محمولا على $\vec{e}_\varphi$، و عبارته:

$$\vec{B} = \frac{\mu I r}{2s}\vec{e}_\varphi \quad (40.1)$$



الشكل (10.1): بنية الحقلين الكهربائي و المغناطيسي الناشئين في ناقل أومي

نستغل عبارتي الحقل الكهربائي والمغناطيسي (38.1) و (40.1) في حساب متجه بوينتينغ كما يلي:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu}\vec{E}\times\vec{B} = -\frac{\rho\, I^2 r}{2s^2}\overrightarrow{e_r} \quad (41.1)$$

نوظف عبارة متجه بوينتينغ في حساب قيمة الطاقة المتدفقة من السطح الخارجي للناقل في وحدة الأزمنة لطول l فتكون:

$$P = \oiint \vec{S}.d\vec{s} = -\frac{\rho I^2 a}{2s^2}.2\pi a l = -\frac{\rho I^2 l}{s} = -\frac{\rho l}{s}I^2 = -RI^2 = -VI(42.1)$$

حيث a نصف قطر مقطع الناقل و R مقاومته الكهربائية.

لنحسب الآن الحد الذي يعطي قيمة الاستطاعة المتبددة في الناقل الأومي من نظرية بوينتينغ:

$$\iiint \vec{E}.\vec{J}\,d\tau = \iiint \rho.J^2 d\tau = \rho\frac{I^2}{s^2}\iiint d\tau = \rho\frac{I^2}{s^2}.A.L = \frac{\rho L}{s}I^2 = RI^2 \quad (43.1)$$

إن الحدين المحسوبين (42.1) و(43.1) يحققان نظرية بوينتينغ، و بالتالي يمكننا الاستنتاج أن الطاقة الكهرومغناطيسية المتدفقة من المنبع تبدد كليا في الناقل الأومي بمفعول جول[14][15].

3.3 تطبيق نظرية بوينتينغ على المكثفة:

لفهم كيفية توزع الطاقة المتدفقة من المنبع إلى المكثفة نحسب الحدود الثلاثة نظرية بوينتينغ، فعبارة الحقل الكهربائي الناشئ في عازل مكثفة اسطوانية استنادا إلى ما ورد في العلاقة (12.1) هو:

$$\vec{E} = \frac{Q}{2\pi\varepsilon L r}\vec{e}_r \quad (44.1)$$

باستخدام معادلة آمبير ماكسويل فإن الحقل المغناطيسي الناشئ في عازل المكثفة سيكون:

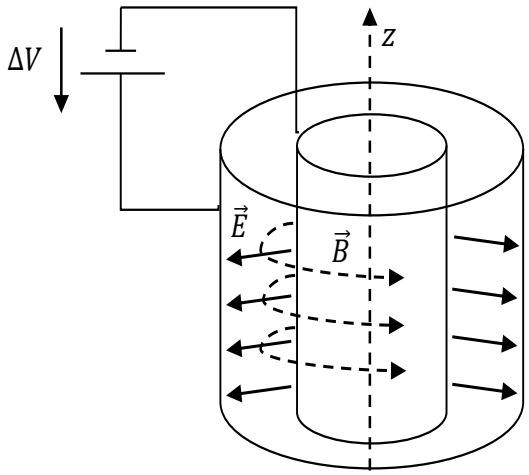
$$\oint \vec{B}.\overrightarrow{dl} = \mu\, I_{conduc\,enc} + \mu\varepsilon \frac{d}{dt}\iint \vec{E}\,.d\vec{s} \quad (45.1)$$

إن تيار التوصيل $I_{conduc\,enc}$ داخل عازل المكثفة معدوم، و باعتبار الجملة المدروسة ذاتَ تناظر أسطواني سيكون الحقل المغناطيسي محمولا على شعاع الوحدة $\vec{e}_\varphi$، و عليه تصبح العلاقة (45.1) كما يلي:

$$B.2\pi r = \mu\varepsilon \frac{d}{dt}\iint \frac{Q}{2\pi\varepsilon L r} 2\pi r dz = \frac{\mu\, z}{L} I \quad (46.1)$$

أي أن عبارة شعاع الحقل المغناطيسي الممثل في الشكل (11.1) ستكون:

$$\vec{B} = \frac{\mu\, z}{2\pi r l} I\, \vec{e}_\varphi \quad (47.1)$$



الشكل (11.1): بنية الحقل الكهربائي و المغناطيسي في مكثفة أسطوانية

بتوظيف عبارتي الحقلين الكهربائي و المغناطيسي (44.1) و(47.1) نحسب متجه بوينتينغ:

$$\vec{S} = \frac{\vec{E}\times\vec{B}}{\mu} = -\frac{Q\, z}{4\,\varepsilon\,\pi^2 l^2 r^2} I\, \vec{e}_z \quad (48.1)$$

نستغل متجه بوينتينغ في حساب الطاقة المتدفقة من المنبع خلال وحدة الزمن:

$$\oiint \vec{S}.d\vec{s} = -\int_{R_1}^{R_2} \frac{Q.2\pi.l}{4\,\varepsilon\,\pi^2 l^2} I \frac{dr}{r} = -\frac{Q}{2\,\pi\,\varepsilon l} ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) I = -\frac{Q}{C}.I = -\Delta V.I \quad (49.1)$$

نحسب الآن الحد الثاني من نظرية بوينتينغ، و هو الحد الخاص بالطاقة المختزنة في الحقول الكهربائي، و ذلك باستغلال عبارة الحقل الكهربائي الواردة في العلاقة (44.1):

$$U_E = \iiint \Omega_E . d\tau = 2\pi l \int_{R_1}^{R_2} \frac{1}{2} \varepsilon E^2 \, r dr = \pi l \varepsilon \left(\frac{Q}{2\pi\varepsilon l}\right)^2 \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = \frac{Q^2}{4\pi l \varepsilon} ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) = \frac{Q^2}{2C} \quad (50.1)$$

و بالتالي سيكون تغير الطاقة المختزنة في الحقل الكهربائي في وحدة الزمن:

$$P = \frac{dU_E}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{Q^2}{2C}\right) = \frac{Q}{C} I \quad (51.1)$$

إن الحدين المحسوبين في العلاقتين (51.1) و (49.1) يحققان نظرية بوينتينغ للطاقة إذْ أن:

$$\frac{dU_E}{dt} + \oiint \vec{S} . d\vec{s} = -\frac{Q}{C} I + \frac{Q}{C} I = 0 \quad (52.1)$$

لهذا نستنتج أن الطاقة الكهرومغناطيسية المتدفقة من المنبع تختزن كليا في الحقول الكهربائية الناشئة في عازل المكثفة.[15][14].

4.3 تطبيق نظـــرية بوينتينغ على الوشيعة:

استنادا إلى ما ورد في العلاقة (18.1) فإن عبارة الحقل المغناطيسي الناشئ عن مرور تيار كهربائي في وشيعة طويلة:

$$\vec{B} = \frac{\mu N I}{l} \vec{k} \quad (53.1)$$

يمكننا إيجاد عبارة الحقل الكهربائي باستخدام قانون فاراداي، و الذي ينص على أن:

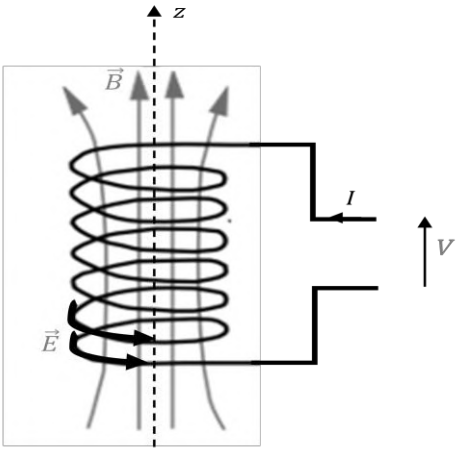
$$\oint \vec{E} . \vec{dl} = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} . d\vec{s} \quad (54.1)$$

فباعتبار الدراسة تتم في الإحداثيات الأسطوانية تبسط العبارة السابقة على النحو:

$$E \, 2\pi r = -\frac{\mu N}{l} \frac{dI}{dt} \pi r^2 \quad (55.1)$$

و هذا ما يجعل عبارة شعاع الحقل الكهربائي المبين في الشكل (13.1) على النحو:

$$\vec{E} = -\frac{\mu N r}{2l} \left(\frac{dI}{dt}\right) \overrightarrow{e_\varphi} \quad (56.1)$$



الشكل (13.1): بنية الحقلين الكهربائي و المغناطيسي في الوشيعة

بتوظيف عبارتي الحقلين الكهربائي و المغناطيسي (53.1) و (56.1) نحسب متجه بوينتينغ:

$$\vec{S} = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{\mu} = -\frac{\mu N^2 r.I}{2l^2}\left(\frac{dI}{dt}\right)\vec{e_r} \quad (57.1)$$

و عليه فالطاقة المتدفقة من المنبع في وحدة الأزمنة ستأخذ الشكل الآتي:

$$\oiint \vec{S}.d\vec{A} = -\frac{\mu N^2 aI}{2l^2}(2\pi al)\left(\frac{dI}{dt}\right) = -\frac{\mu N^2 \pi a^2}{l} I\left(\frac{dI}{dt}\right) = -L\frac{dI}{dt}I = -V.I \quad (58.1)$$

حيث a نصف قطر مقطع الوشيعة.

أما الحد الثاني من نظرية بوينتينغ، و هو الحد الخاص بالطاقة المختزنة في الحقول المغناطيسية، و باستغلال عبارة الحقل المغناطيسي الواردة في العلاقة (18.1) سيكون:

$$U_B = \Omega_B.Volume = \left(\frac{B^2}{2\mu}\right)(\pi r^2 l) = \frac{\mu N^2 a^2 \pi l}{2l^2} I^2 = \frac{1}{2}LI^2 \quad (59.1)$$

و بالتالي فالمعدل الزمني لتغير الطاقة المختزنة في الوشيعة:

$$\frac{dU_B}{dt} = LI\left(\frac{dI}{dt}\right) \quad (60.1)$$

إن الحدين المحسوبين في العلاقتين (58.1) و (60.1) يحققان نظرية بوينتينغ؛ إذْ أن:

$$\frac{dU_B}{dt} + \oint \vec{S}.d\vec{A} = LI\left(\frac{dI}{dt}\right) - LI\left(\frac{dI}{dt}\right) = 0 \quad (61.1)$$

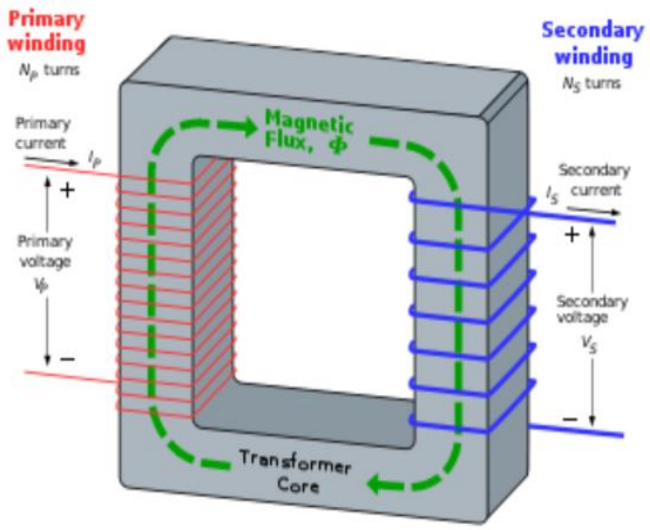
نستنتج إذن أن الطاقة الكهرومغناطيسية المتدفقة من المنبع تخزن كليا في الحقول المغناطيسية الناشئة في نواة الوشيعة[14][15].

نخلص من خلال هذه الفقرة إلى أن الناقل الأومي يحوّل الطاقة التي يتلقاها من المنبع إلى حرارة ظاهرة عليه، بينما تختزن المكثفةُ الطاقةَ في الحقل الكهربائي بين لبوسيْها، في حين تختزن الوشيعةُ الطاقةَ في حقلها المغناطيسي.

III. الدراسة الطاقوية للمحولات الحثية:

1.3 تعريف المحول الحثي:

هو تركيب مؤلف من وشيعتين مختلفتين في عدد اللفات، متوازيتي المحور، ملفوفتين حول قلب حديدي، بحيث تفصلهما مسافة صغيرة، كما يوضح الشكل (14.1)

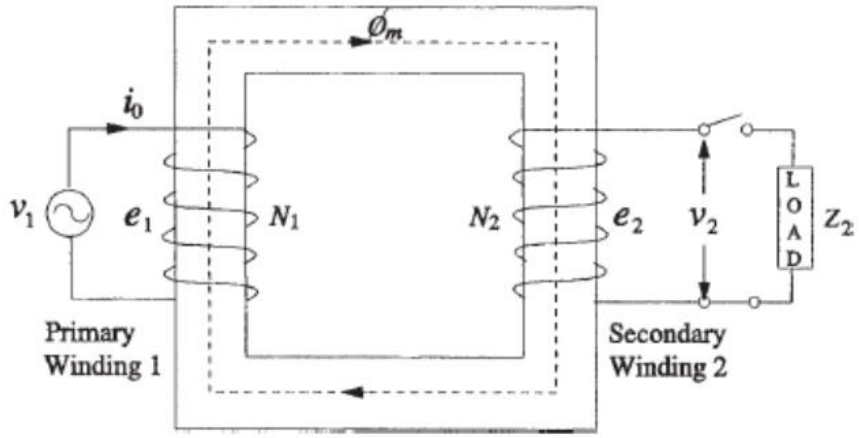


الشكل (14.1): محول كهربائي حثي

توصل إحدى الوشيعتين بمولد كهربائي، و تسمى عندئذ بالملف الابتدائي، و توصل الوشيعة الأخرى بالحمولة، و تسمى بالملف الثانوي، فيتم نقل الطاقة من المولد إلى الحمولة عبر المحوّل مع رفع التوتر الكهربائي أو خفضه بنسبة محددة[1][13].

2.3 نسبة الجهد المحوَّلة للحمولة في المحول الحثي:

الدارة الكهربائية في الشكل (15.1) توضح توصيل الملف الابتدائي للمحوّل مع مولد جهد متناوب جيبي ذي تواتر w، و توصيل حمولة ذات مقاومة R مع ملفه الثانوي.



الشكل (15.1): توصيل أقطاب المحول الكهربائي بالمولد و الحمولة

عندما يسري تيار كهربائي متناوب في الملف الابتدائي ذي عدد اللفات N_1 تنشأ حقول مغناطسية $\vec{B}$، و تتدفق عبر سطح الوشيعة A، و يكون تغير تدفق هذه الحقول المغناطيسية كالتالي:

$$V_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (62.1)$$

إذا اعتبرنا هذا المحول مثاليًا فإن الحقول الناشئة $\vec{B}$ من الملف الأول و المترددة تتدفق عبر سطح الملف الثانوي A، منتجة بذلك توتّرًا كهربائيا بين طرفيه؛ فحسب قانون فاراداي–لانز ستكون عبارته بالشكل.[13][1]

$$V_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (63.1)$$

نعرف النسبة المحوَّلة للجهد على أنها النسبة بين توتر الحمولة و توتر المولد:

$$\eta = \frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (64.1)$$

نلاحظ أن نسبة الجهد المحولة لا تتعلق سوى بعدد لفات الوشيعتين، و بهذا تصنف المحولات الحثية إلى صنفين: محولات رافعة لقيمة الجهد و أخرى خافضة له، و ذلك حسب قيمة النسبة المحولة، إذْ أن:

محول رفع الجهد $\eta = \frac{N_2}{N_1} > 1$ محول خفض الجهد $\eta = \frac{N_2}{N_1} < 1$

تدلنا العلاقة (64.1) إلى أن نسبة الجهد المحولة في المحول الحثي ثابتة، و لا تتعلق بمقاومة الحمولة R أو تواتر المولد w.

تجدر الإشارة إلى أن المحول الحثي لا يشتغل في حالة توصيله بمولد جهد مستمر، و ذلك أن التوتر بين طرفي الملفين الابتدائي و الثانوي يكون معدوما حسب العلاقة (19.1)[13][1].

3.3 المردود الطاقوي للمحول الحثي:

نعرف المردود الطاقوي $\Re$ على أنه نسبة الطاقة المستهلكة في الحمولة بفعل جول خلال وحدة الأزمنة من الطاقة المنتجة من المولد خلال الفترة نفسها. بتعبير أبسط يمكننا القول إن المردود الطاقوي هو نسبة الاستطاعة المبددة في الحمولة P_2 من الاستطاعة المنتجة من المولد P_1، و نكتب إذن[13][1]:

$$\Re = \frac{P_2}{P_1} = \frac{V_2.I_2}{V_1.I_1} \quad (65.1)$$

استنادا إلى العلاقة (59.1) فإن الحقول المغناطيسية الناشئة عند مرور تيار كهربائي في الملف الابتدائي للمحول الحثي تختزن طاقة مقدارها:

$$U_1 = \frac{1}{2}L_1I_1^2 \quad (66.1)$$

باعتبار أن الوشيعتين لهما السطح نفسه A و الطول نفسه l، و يتدفق عبر سطحيْهما الحقل المغناطيسي نفسه $\vec{B}$، فإن الطاقة المختزنة في الملف الأول تكافئ الطاقة المختزنة في الملف الثانوي:

$$\frac{B^2}{2\mu}.Volume = U_1 = U_2 \quad (67.1)$$

عند توصيل الحمولة بالملف الثانوي سيمر خلالهما تيار كهربائي I_2 يسمح بتبديد الطاقة المختزنة في الملف الثانوي U_2 في الحمولة، و ترتبط شدة التيار I_2 بالطاقة U_2 بالعلاقة:

$$U_2 = \frac{1}{2}L_2I_2^2 \quad (68.1)$$

باستغلال العلاقات (66.1)، (67.1) و(68.1) يمكننا كتابة:

$$\frac{1}{2}L_1I_1^2 = \frac{1}{2}L_2I_2^2 \quad (69.1)$$

بتعويض عبارتي الذاتيتين L_1 وL_2 بما ورد في (19.1)، و كذا عبارتي التيارين I_1 و I_2 بما ورد في (18.1) تصبح العبارة (69.1) بالشكل:

$$\left(\frac{\mu N_1^2 A}{l}\right)\left(\frac{Bl}{\mu N_1}\right)I_1 = \left(\frac{\mu N_2^2 A}{l}\right)\left(\frac{Bl}{\mu N_2}\right)I_2 \quad (70.1)$$

بتبسيط العلاقة الأخيرة نجد عبارة التيار الكهربائي المار في الملف الثانوي I_2 بدلالة تيار الملف الابتدائي من الشكل:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{\eta} \quad (71.1)$$

تدلنا هذه العبارة على أن رفع الجهد V_2 مقارنة بـV_1 في المحول الحثي يرافقه خفض لشدة التيار I_2 مقارنة بـ I_1 [13][1]، كما يمكن استغلالها في حساب المردود $\Re$ بتعويضها في العلاقة (65.1):

$$\Re = \frac{\Delta V_2}{\Delta V_1}.\frac{I_2}{I_1} = \eta.\frac{1}{\eta} = 1 \quad (72.1)$$

من الواضح أن المردود الطاقوي يساوي 1، و هذا يعني أن المحول الحثي يحول كل الطاقة التي يكتسبها من المنبع إلى الحمولة، و هو ما يوسع استعمالاته في تكنولوجيا العصر الحالي[13][1]. كما نلاحظ أيضا من خلال العلاقة (72.1) أن المردود الطاقوي ثابت و لا يتعلق بمقاومة الحمولة R أو تواتر المولد w.

4.3 المحولات الحثية الحقيقية:

إن القيمة المتحصل عليها سابقا للمردود الطاقوي في المحولات الحثية تَعتبِر المحولَ مثاليًا، و لكن الحقائق التجريبية تختلف، فهناك عدة ظواهر ترافق عمل المحولات الحثية الحقيقية، تؤثر على نسبتها المحوّلة و على مردودها الطاقوي، من بينها[13][1]:

أ) المقاومة الداخلية للوشائع:

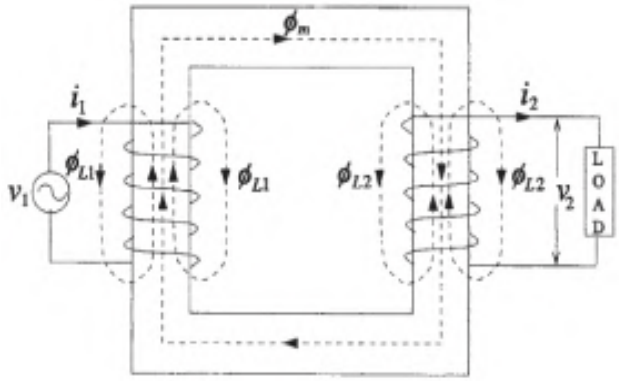
تملك الوشيعتان الابتدائية و الثانوية مقاومة داخلية تتوقف قيمتهما على نوع الناقل و مساحة مقطعه، و عند أخذ قيمتيْهما في الحسْبان فهذا يعني أن التوتر بين طرفي الوشيعة الابتدائية لا يساوي جهد المولد بسبب هبوط الجهد، كما أن التوتر بين طرفي الوشيعة الثانوية لا يساوي بالضرورة الجهد الناشئ بالحث داخل الملفات، إضافة إلى تبديدهما للطاقة بفعل جول، و بالتالي تتناقص قيمة المردود الطاقوي لتصبح[1]:

$$\Re = \frac{V_2 I_2}{V_2 I_2 + \frac{{V_1}^2}{R_1} + R_2 {I_2}^2} \quad (73.1)$$

حيث R_1 و R_2 المقاومتين الداخليتين للوشيعتين الابتدائية والثانوية على الترتيب .

ب) الفيض المغناطيسي المتسرب:

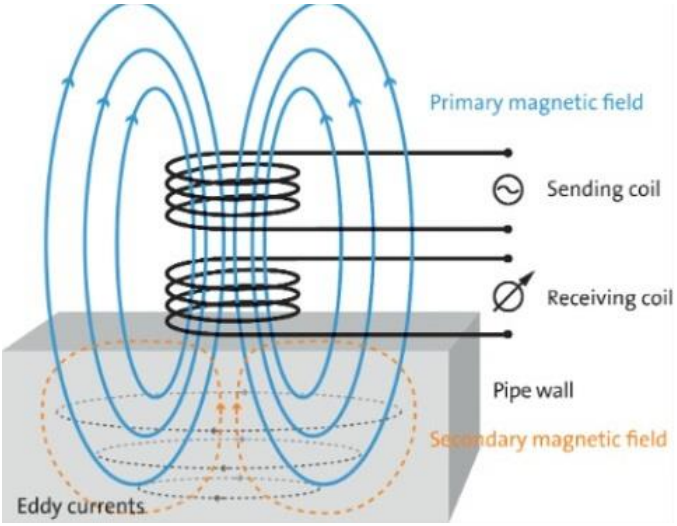
في المحول المثالي يتم افتراض أن الفيض المغناطيسي الناشئ يتدفق كله عبر الملف الثانوي دون تشتيت، و هذا مُنافٍ للواقع، فالصحيح أن هناك فيضا متسربا من كلا الملفين كما يُظهر الشكل (16.1)، و هو متناسب طردا مع المسافة الفاصلة بين الملفين، لذلك نجد عمليا أن الملفات الابتدائية توضع متشابكة مع الملفات الثانوية، كما يمكن استعمال نواة حديدية تتفاعل مع الحقول المغناطيسية المتولدة، بحيث تعمل على جمعها و توجيهها نحو الملف الثانوي[1].



الشكل(16.1): تسرب الفيض المغناطيسي في الملفين الابتدائي و الثانوي

ج) التيارات الدوامية:

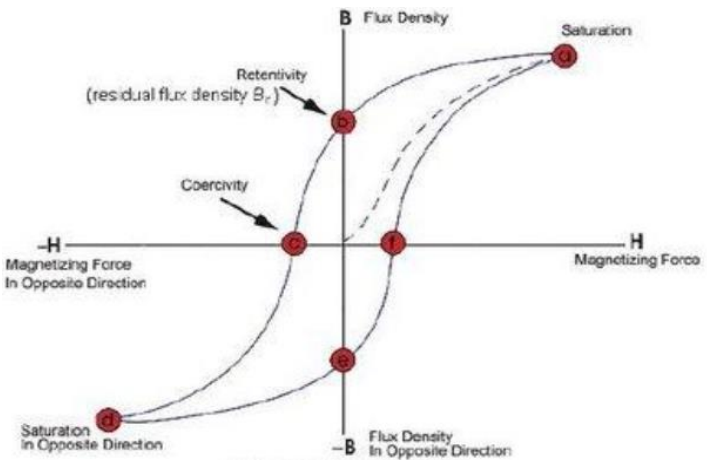
طبقا لقانون فاراداي فإن الفيض المغناطيسي المتولد حين يتدفق عبر سطح ناقل فإنه يولد فيه تيارا كهربائيا، ينطبق هذا القانون على الوشيعتين الابتدائية و الثانوية، كما ينطبق على النواة الحديدية؛ إذْ أن التدفق المغناطيسي عبرها يولد تيارات دوامية غير مرغوبة يُظهرها الشكل (17.1)، تبدِّد جزءًا من الطاقة المختزنة في الحقول المغناطيسية على شكل حرارة، لذلك تُجعل النواة الحديدية ذات مقاومة كبيرة عن طريق صنعها من شرائح معدنية رفيعة و مضغوطة معا و معزولة عن بعضها[1].



الشكل (17.1): التيارات الدوامية الناشئة في قطعة حديد قريبة من وشيعة

د) الاستجابة الحثية:

عند مرور الفيض المغناطيسي في النواة فإن جزيئات الحديد تستجيب له بدرجة ما، فتترتّب بانتظام في اتجاه الحقول المغناطسية المؤثرة عليها، و عند تناقص شدة الحقول المغناطيسية فإنه من المفترض أن يختفي هذا التأثير على الجزيئات، ولكن هذا لا يحصل إلا في المحوّل المثالي؛ إذْ يبقى جزءٌ من الحقول المغناطيسية في النواة الحديدية يسمى الفيض المتبقي الشكل (18.1)؛ أي أننا نفقد بذلك جزءًا من الطاقة المختزنة في الحقول المغناطيسية بفعل هذه الظاهرة[1]، و التي تُدعى التخلف أو البطاء المغناطيسي (Hysteresis).



الشكل (18.1): منحنى استجابة النواة الحديدية للمغنطة الخارجية

5.3 مزايا المحولات الحثية و نقائصها:

تمتلك المحولات الحثية عدة مزايا أهمها[1]:

أ) خفض شدة التيار و رفع قيمة الجهد مع المحافظة على الطاقة المحولة، و بالتالي تقليل الطاقة المتبددة بفعل جول أثناء نقل الطاقة الكهربائية عبر أسلاك النقل لمسافات بعيدة.

ب) التحكم في رفع وخفض قيمتي الجهد والتيار فقط من خلال التغيير في عدد اللفات.

كما أنها تعاني العديد من النقائص من بينها[1]:

أ) تتميز المحولات الحثية بحجم كبير نظرا لبنيتها المكونة من وشائع ذات عدد كبير من اللفات.

ب) ارتفاع درجة الحرارة؛ إذ تتسبب المقاومات الداخلية و التيارات الدوّامية في رفع درجة المحولات الحثية بشكل كبير، و هو ما يجعلها دوما بحاجة إلى نظام تبريد تستعمل فيه المراوح و الزيوت.

ج) الضوضاء: تنبعث أصوات مزعجة من المحولات الحثية، و اهتزاز النواة الحديدية هو المصدر الأساس لهذه الضوضاء؛ فعندما تتمغنط شريحة من الصلب فإنها تنكمش أو تتمدد بنسبة صغيرة تصل إلى حوالي 10 µm/s، ممّا يتسبب في هذا الصوت.

الفصل الثاني

الحسابات النظرية للمحولات السعوية

الفصل الثاني: الحسابات النظرية للمحولات السعوية

تمهيـــــــــــد:

بعد تعرفنـا على المحـوّلات الحثيـة و قدرتها على خفض أو رفع قيمتي الجهد و التيار مع مردود طاقوي كبير، يتبـادر إلى أذهاننا إمكانية توظيف عناصر كهربائية خاملة أخرى في إنشاء محوّل كهربائي، له القدرة على نقل الطاقة الكهربائية من المولد إلى الحمولة بمردود معتبر، لذلك سنسعى من خلال هذا الفصل إلى دراسة محول كهربائي سعوي؛ إذ يُطلَق عليه هذا الوصف نظرا لاستناد بنيته إلى مجموعة من المكثفات بدلا من الوشائع، فما بنية هذا المحول و خواصه؟ و ما كيفية تغيرات قيمة نسبته المحوّلة و مردوده الطاقوي؟

I. بنيـة المحـــولات السعويـــة:

يتكون المحول السعوي المنجز من أربع اسطوانات نحاسية ذات أقطار $14\,mm$، $16\,mm$، $22\,mm$ و $28\,mm$، هذه الأسطوانات متمحورة و أطوالها $l = 1m$ ، ويفصل بينها عازل (الهواء)كما هو موضح في الشكل (1.2) التالي:

الشكل (1.2): بنية المحول السعوي المنجز

لقد تعذّر علينا عمليا ترك الهواء كفاصل بين الاسطوانتين ذات القطرين $14\,mm$ و $16\,mm$ ، نظرا للتلامس بينهما، لذلك استعملنا شريطا لاصقا مصنوعا من متعدد الميثيلين كعازل بينهما، ولتوصيل أسلاك القياس بسهولة تم ترك طول $1cm$ كفارق بين طول كل اسطوانة والتي تليها.

تُشكل كل أسطوانتين يفصل بينهما عازل مكثفة اسطوانية، لذلك يمكننا اعتبار التركيب المنجز على أنه ثلاث مكثفات موصولة على التسلسل، سعاتها محسوبة نظريا بالعلاقة (10.1)، وموضحة في الجدول أدناه:

الجدول (1.2): سعة مكثفات المحوِّل السعوي المنجز

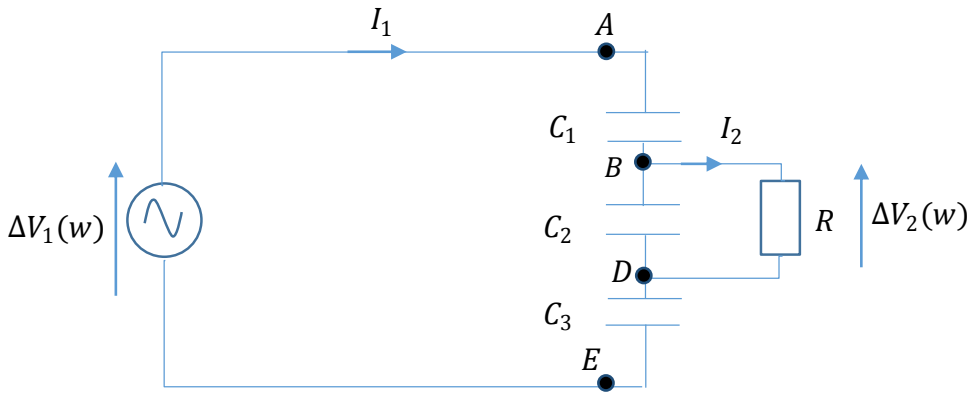
المكثفة	$r_i(mm)$	$r_f(mm)$	$l\ (m)$	$\varepsilon_0(pF.m^{-1})$	ε_r	$C\ (nF)$
1	14.5	15.5	0.99	8.854	2.8	2.31
2	16.5	21.5	0.98	8.854	1	0.205
3	22.5	27	0.97	8.854	1	0.296

نوصل الأسطوانتين (1) و(4) بطرفي مولد جهد متناوب ذي تواتر w، و نوصل الأسطوانتين (2) و (3) بحمولة ذات مقاومة R، و نحسب خلال هذا الفصل نظريا نسبة الجهد المحوّلة و المردود الطاقوي للمحول السعوي بطريقتين:

1. استعمال قوانين الشبكات الكهربائية.
2. تطبيق نظرية بوينتينغ للطاقة.

II. الدراسة النظرية باستعمال قوانين الشبكات:

تعتمد قوانين الشبكات بصفة أساسية على قانون أوم وكذا قانوني كيرشوف للعروات و العقد. نسعى من خلال هذه الفقرة إلى تطبيق هاته القوانين لإيجاد عبارة نسبة الجهد المحوّلة للحمولة η، و المردود الطاقوي للمحول السعوي $\Re$، لأجل ذلك ننمذج التركيب المنجز بالدارة الكهربائية التالية:



الشكل (2.2): الدارة الكهربائية المنمذجة للمحوّل السعوي المنجز

1.2 النسبـــة المحوّلة للجهد في المحول السعوي:

كما ورد في العلاقة (17.1)، فإن ممانعة كل مكثفة من مكثفات التركيب تأخذ الشكل:

$$Z_i = \frac{1}{jC_i w} \quad : \qquad i = 1,2,3 \qquad (1.2)$$

بما أن المكثفات موصولة على التسلسل تكون الممانعة المكافئة للجزء الخامل من الدارة:

$$Z_{eq} = Z_1 + Z_{2eq} + Z_3 \qquad (2.2)$$

حيث Z_{2eq} هي الممانعة المكافئة لممانعة المكثفة (2) مربوطةً مع المقاومة R على التوازي:

$$Z_{2eq} = \frac{R.Z_2}{R + Z_2} = \frac{R}{jRC_2 w + 1} \qquad (3.2)$$

بتعويض عبارة Z_{2eq} في العلاقة (2.2) نجد أن ممانعة الدارة تكون على النحو:

$$Z_{eq} = \frac{1}{jC_1w} + \frac{R}{RjC_2w+1} + \frac{1}{jC_3w} = \frac{Rw(C_1C_2 + C_1C_3 + C_3C_4) - j(C_1 + C_3)}{C_1C_3w(RjC_2w+1)} \quad (4.2)$$

عندما يسري في المولد تيار I_1 فإن التوتر بين طرفي الحمولة ΔV_2 حسب قانون أوم:

$$\Delta V_2 = Z_{2eq}I_1 \quad (5.2)$$

في حين يكون التوتر بين طرفي المولد ΔV_1:

$$\Delta V_1 = Z_{eq}I_1 \quad (6.2)$$

تعرف النسبة المحولة على أنها نسبة التوتر بين طرفي الحمولة ΔV_2 من التوتر بين طرفي المولد ΔV_1:

$$\eta = \frac{\Delta V_2}{\Delta V_1} = \frac{Z_{2eq}}{Z_{eq}} \quad (7.2)$$

بدمج العلاقتين (3.2) و (4.2) نتوصل إلى قيمة النسبة المحولة بدلالة المقادير المميزة للدارة كما يلي:

$$\eta = \left|\frac{Z_{2eq}}{Z_{eq}}\right| = \frac{C_1C_3}{\sqrt{\left(\frac{C_1+C_3}{Rw}\right)^2 + (C_1C_3 + C_2C_3 + C_1C_2)^2}} \quad (8.2)$$

2.2 عبارة المردود الطاقوي للمحوّل السعوي:

إن الاستطاعة المصروفة في الحمولة حسب ما ورد في العلاقة (32.1):

$$P_2 = \Delta V_2 I_2 = \frac{{\Delta V_2}^2}{R} \quad (9.2)$$

في حين أن الاستطاعة المقدمة من طرف المولد:

$$P_1 = \Delta V_1\, I_1 = \frac{{\Delta V_1}^2}{Z_{eq}} \quad (10.2)$$

نعرف المردود الطاقوي على أنه نسبة الاستطاعة المصروفة في الحمولة P_2من الاستطاعة المقدمة من المولد P_1:

$$\Re = \frac{P_2}{P_1} = \frac{{\Delta V_2}^2}{R}\frac{Z_{eq}}{{\Delta V_1}^2} = \eta^2\frac{Z_{eq}}{R} = \eta\frac{Z_{2eq}}{R} = \frac{\eta}{\sqrt{1 + R^2{C_2}^2w^2}} \quad (11.2)$$

و بالتالي ستكون عبارة المردود الطاقوي بدلالة المقادير المميزة للدارة كما يلي:

$$\Re = \frac{1}{\sqrt{1 + R^2C_2^2w^2}}\frac{C_1C_3}{\sqrt{\left(\frac{C_1+C_3}{Rw}\right)^2 + (C_1C_2 + C_2C_3 + C_1C_3)^2}} \quad (12.2)$$

III. الدراسة النظرية باستعمال نظرية بوينتينغ للطاقة:

1.3 نسبـــة الجهد المحـــوّلـــة:

تعتمد نظرية بوينتينغ لانحفاظ الطاقة على إحصاء الطاقات المتدفقة من المنبع و المختزنة في الحقول الكهرومغناطيسية و المتبددة في النواقل بفعل جول. لذا نستغل هذه النظرية في حساب نسبة الجهد المحولة و كذا المردود الطاقوي للمحول السعوي.

في تركيبنا المنجز فإن الطاقة المتدفقة من المنبع تتوزع إلى طاقة مختزنة في الحقول الكهربائية الناشئة في عوازل المكثفات الثلاثة و إلى طاقة متبددة في الحمولة باعتبارها ناقلا أوميًا؛ إذْ تنصُّ نظرية بوينتينغ على:

$$\frac{dU_{EB}}{dt} + \iiint \vec{E}.\vec{J}\, d\tau = -\oiint \vec{S}.d\vec{A} \quad (13.2)$$

باستخدام العلاقات المستخرجة من تطبيق نظرية بوينتينغ على العناصر الخاملة في الفصل الأول، يمكننا كتابة حدود العبارة (13.2) كما يلي:

– الاستطاعة المتدفقة من المنبع كما ورد في العلاقات (42.1)، (49.1) و (58.1) تكون من الشكل:

$$\oiint \vec{S}.d\vec{A} = -V_1 I_1 \quad (14.2)$$

– الاستطاعة المختزنة في الحقول الكهربائية الناشئة في عوازل المكثفات كما ورد في العلاقة (51.1) يكون:

$$\frac{dU_E}{dt} = \frac{Q_1}{C_1}\frac{dQ_1}{dt} + \frac{Q_2}{C_2}\frac{dQ_2}{dt} + \frac{Q_3}{C_3}\frac{dQ_3}{dt} \quad (15.2)$$

– الطاقة المتبددة في الناقل الأومي كما ورد في العلاقة (43.1) تكون:

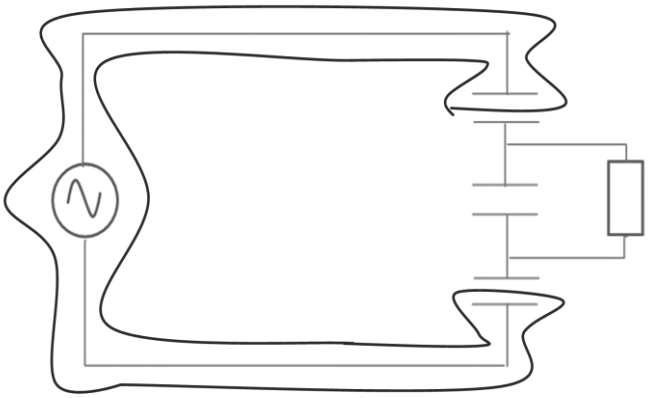
$$\iiint \vec{E}.\vec{J}\, d\tau = RI^2 \quad (16.2)$$

بتعويض هذه الحدود الثلاثة (14.2)، (15.2) و (16.2) في العلاقة (13.2) نجد:

$$V_1 I_1 = \frac{Q_1}{C_1}\frac{dQ_1}{dt} + \frac{Q_2}{C_2}\frac{dQ_2}{dt} + \frac{Q_3}{C_3}\frac{dQ_3}{dt} + RI_2^2 \quad (17.2)$$

نعلم حسب مبدأ انحفاظ الشحنة في الجملة المكوَّنة من النواقل المبينة في الشكل (3.2) أن:

$$Q_1 = Q_3 = Q \quad (18.2)$$



الشكل (3.2): تساوي شحنتي مكثفتين على التسلسل حسب مبدأ انحفاظ الشحنة

فبالتالي ستكون شدة التيار الكهربائي المار في هذا الجزء من التركيب

$$I_1 = \frac{dQ}{dt} \quad (19.2)$$

إن فرق الكمون بين النقطتين B وD هو تجوال الحقل الكهربائي بينهما، و هذا ينتج لنا:

$$\begin{cases} V_2 = \int \vec{E}\,.\,d\vec{l} = \dfrac{Q_2}{C_2} \\ V_2 = \int \vec{E}\,.\,d\vec{l} = RI_s \end{cases} \rightarrow V_2 = \frac{Q_2}{C_2} = RI_2 \quad (20.2)$$

بتعويض المقادير (18.2)، (19.2) و(20.2) في العلاقة (17.2) نجد:

$$V_1 I_1 = QI_1 \frac{C_{1+}C_3}{C_1 C_3} + RI_2 \frac{dQ_2}{dt} + RI_2^2 \quad (21.2)$$

باستخدام الصيغة التكاملية لمعادلة الاستمرارية على النقطة B و التي تنص على:

$$\frac{dQ_2}{dt} = \iint \vec{J}\,.\,d\vec{s} \quad (22.2)$$

يمكننا التوصل بالمعالجة الرياضية إلى عبارة تكافئ قانون العقد لكيرشوف في الشبكات، و هي:

$$I_1 = \frac{dQ_2}{dt} + I_2 \quad (23.2)$$

نعوض الآن المقدار $\frac{dQ_2}{dt}$ المستخرج من العلاقة (23.2) في العلاقة (21.2) فنجد:

$$V_1 I_1 = Q I_1 \frac{C_{1+}C_3}{C_1 C_3} + R I_2 (I_1 - I_2) + R I_2^2 \quad (24.2)$$

بتبسيط هذه العبارة و اختصار I_1 نجد أن:

$$V_1 = Q \frac{C_{1+}C_3}{C_1 C_3} + V_2 \quad (25.2)$$

إن اعتبار تيار المنبـــع جيبيا من الشكل $I_1 = I_0 e^{jwt}$، يجعل قيمة الشحنة Q_i تتغير جيبيا على النحو $Q_i = Q_{i0} e^{jwt}$، و هكذا تصبح العلاقة (23.2) كالتالي:

$$I_1 = (jwRC_2 + 1) I_2 \quad (26.2)$$

و لأن:

$$I_1 = \frac{dQ}{dt} = jwQ \quad (27.2)$$

تصبح العلاقة (24.2) بعد تعويض عبارة Q كما يلي:

$$V_1 = \left(\frac{jwRC_2 + 1}{jw}\right) \frac{V_2}{R} \frac{C_{1+}C_3}{C_1 C_3} + V_2 \quad (28.2)$$

تسمح لنا العبارة الأخيرة بالحصول على قيمة النسبة المحوّلة η :

$$\eta = \frac{V_2}{V_1} = \frac{C_1 C_3}{\sqrt{\left(\frac{C_1 + C_3}{Rw}\right)^2 + (C_1 C_3 + C_2 C_3 + C_1 C_2)^2}} \quad (29.2)$$

2.3 المردود الطاقـوي للمحول السعوي:

كما سبق تعريف المردود بأنه نسبة الاستطاعة المتبددة في الحمولة من الاستطاعة المقدمة من المنبع

$$\Re = \frac{P_2}{P_1} = \frac{V_2 I_2}{V_1 I_1} = \eta \frac{I_2}{I_1} \quad (30.2)$$

باستعمال العبارتين (26.2) و (29.2) تصبح عبارة المردود الطاقوي

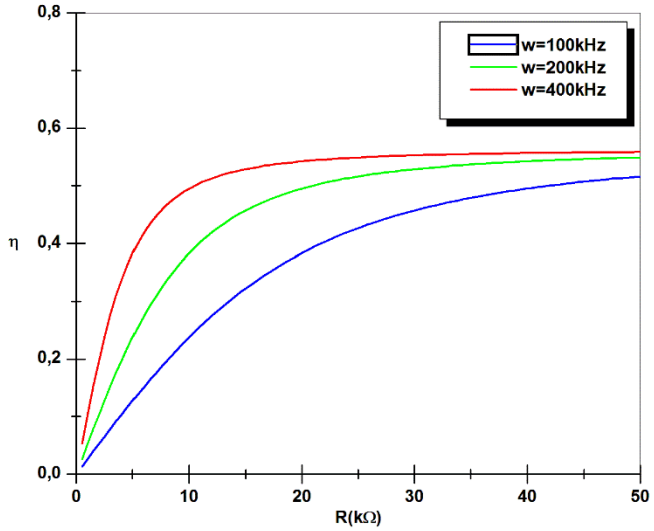
$$\Re = \frac{1}{\sqrt{1 + R^2 C_2^2 w^2}} \frac{C_1 C_3}{\sqrt{\frac{(C_1 + C_3)^2}{R^2 w^2} + (C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_1 C_3)^2}} \quad (31.2)$$

و بالتالي فعبارتا النسبة المحوّلة و المردود الطاقوي المستخرجتيْن من قوانين الشبكات تماثلان نظيرتيْهما المستخرجتيْن من نظرية بوينتينغ لانحفاظ الطاقة.

IV. تغيرات نسبة الجهد المحولة في المحول السعوي بدلالة مقاومة الحمولة و تواتر المولد:

1.4 تغيرات نسبة الجهد المحولة بدلالة مقاومة الحمولة في المحول السعوي:

لفهم تغير النسبة المحولة η في المحول السعوي بدلالة مقاومة الحمولة R نرسم المنحنى $\eta = f(R)$ من أجل عدة قيم لتواتر المولد w، و ذلك باعتبار سعات مكثفات التركيب C_i فيكون من الشكل:



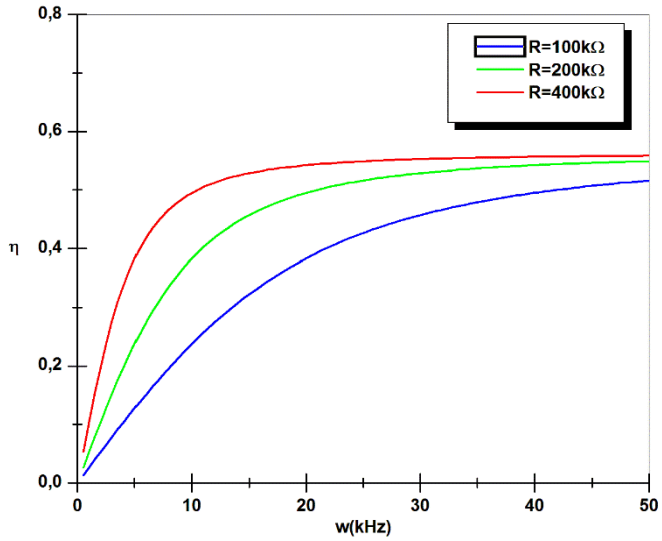
الشكل (4.2): تغير نسبة الجهد المحولة η بدلالة مقاومة الحمولة R

من خلال المنحنى يتبين أن النسبة المحولة تتزايد مع تزايد مقاومة الحمولة، و يمكن إثبات أنها تؤول إلى المقدار:

$$\eta_{max} = \lim_{R\to\infty} \eta = \frac{C_1C_3}{C_1C_3 + C_1C_2 + C_2C_3} = 0.561 \quad (32.2)$$

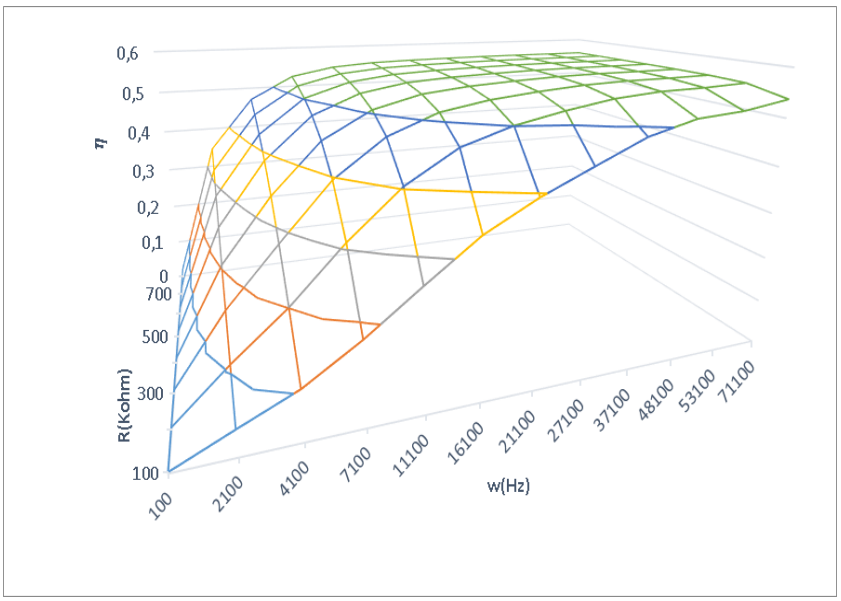
2.4 تغيرات نسبة الجهد المحولة بدلالة تواتر المولد في المحول السعوي:

لمعرفة تغير النسبة المحولة η بدلالة تواتر المولد w نرسم المنحنى $\eta = f(w)$ من أجل عدة قيم لمقاومة الحمولة R، و ذلك باعتبار المكثفات C_i ثابتة فيكون من الشكل:



الشكل (5.2): تغير نسبة الجهد المحولة η بدلالة تواتر المولد w

نخلص من خلال المنحنيين (4.3) و(5.3) أن عبارة النسبة المحولة تتزايد بزيادة مقاومة الحمولة R أو زيادة تواتر المولد w أو زيادة كليْهما، و نرسمها بدلالة المتغيرين R و w في الشكل ثلاثي الأبعاد التالي:

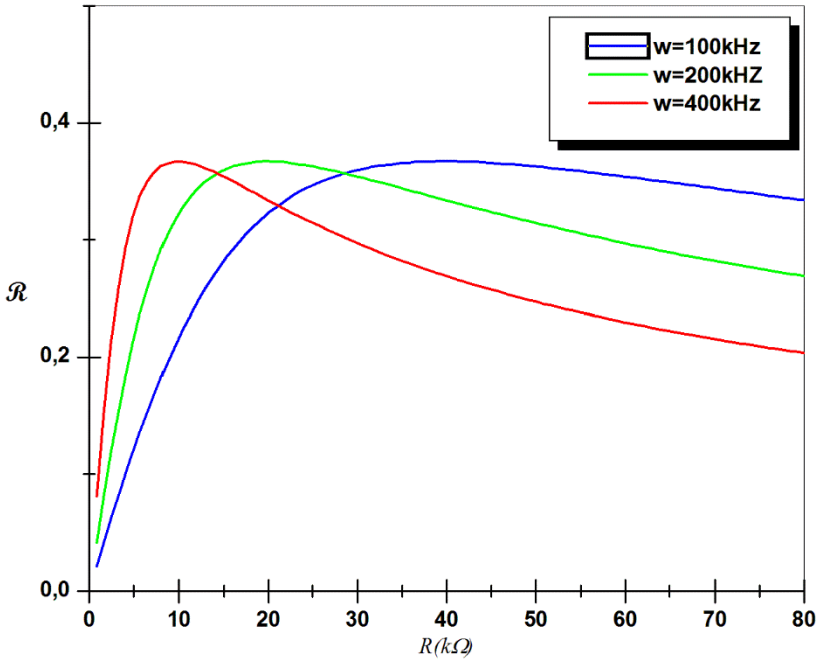


الشكل (6.2): تغير النسبة المحولة η بدلالة تواتر المولد w و مقاومة الحمولة R

V. تغيرات المردود الطاقوي للمحول السعوي بدلالة مقاومة الحمولة و تواتر المولد:

1.5 تغيرات المردود الطاقوي بدلالة مقاومة الحمولة:

تسمح لنا عبارة المردود الطاقوي للمحول السعوي الواردة في العلاقة (31.2) برسم المنحنى $\Re = f(R)$ الموضح في الشكل (7.3)، و الذي يعطي تغيرات المردود الطاقوي بدلالة مقاومة الحمولة من أجل عدة قيم تواتر المولد w:



الشكل (7.2): تغير المردود الطاقوي $\Re$ بدلالة مقاومة الحمولة R

يتبين من خلال هذا المنحنى أن المردود الطاقوي يبلغ قيمة عظمى يمكن إثبات أنها:

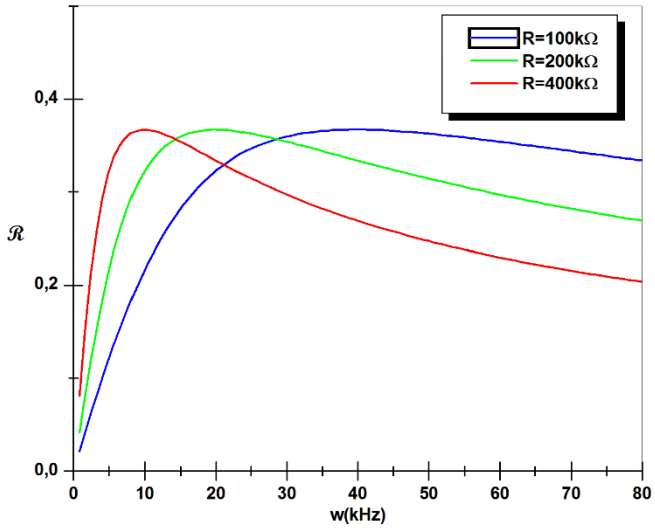
$$\Re_{max} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2C_1C_2+C_1C_3+2C_2C_3}{C_1C_2+C_1C_3+C_2C_3}}\sqrt{\frac{3C_2}{C_1}+\frac{3C_2}{C_3}+\frac{2{C_2}^2}{{C_1}^2}+\frac{2{C_2}^2}{{C_3}^2}+\frac{4{C_2}^2}{C_1C_3}+1}} = 0.390 \quad (33.2)$$

و ذلك عند مقاومة:

$$R = \frac{1}{w}\frac{\sqrt{(C_1.C_2)^2 + C_1.C_2.C_3(C_1+2C_2+C_3)+(C_2.C_3)^2}}{C_2(C_1C_2+C_2C_3+C_1C_3)} = \frac{3.23\times10^9F^{-1}}{w} \quad (34.2)$$

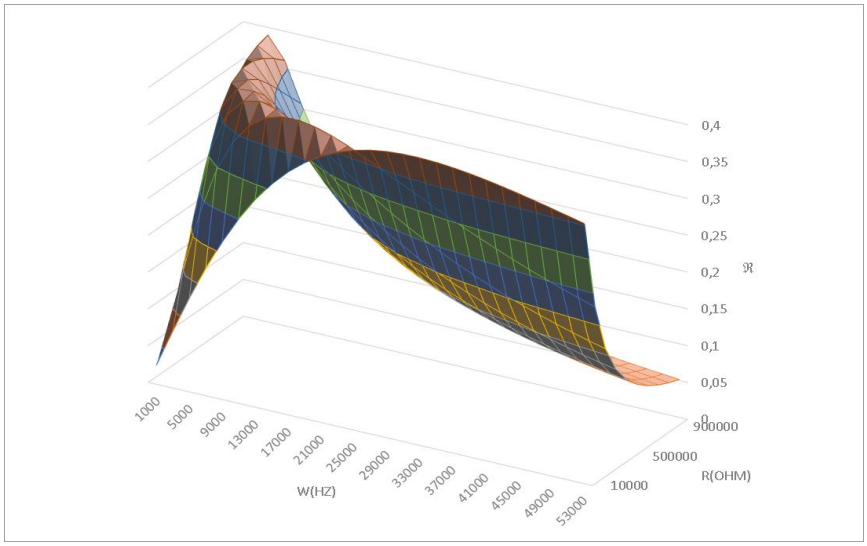
2.5 تغيرات المردود الطاقوي بدلالة تواتر المولد:

لمعرفة تغيرات المردود الطاقوي بدلالة تواتر المولد w من أجل عدة قيم لمقاومة الحمولة w نرسم المنحنى $\Re = f(w)$ الموضح في الشكل:



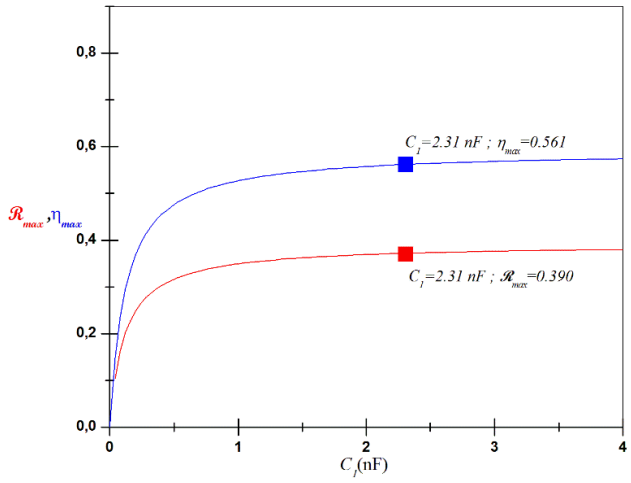
الشكل (8.2): تغير المردود الطاقوي $\Re$ بدلالة تواتر المولد w

ندمج المنحنيين (7.3) و(8.3) للحصول على المردود الطاقوي $\Re$ كدالة للمتغيرين R و w في الشكل ثلاثي الأبعاد التالي:



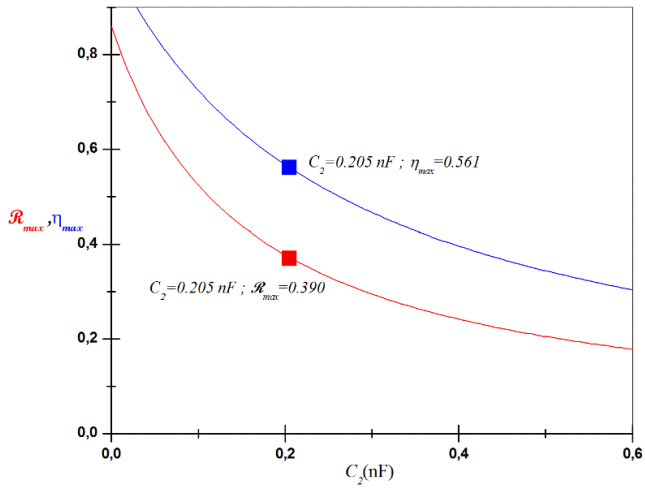
الشكل (9.2): تغير النسبة المردود الطاقوي $\Re$ بدلالة تواتر المولد w و مقاومة الحمولة R

تجدر الإشارة إلى أن كلًّا من النسبة المحولة العظمى و المردود الطاقوي الأعظمي في المحولات السعوية يتعلقان بسعة مكثفات التركيب المنجز، و يمكن رسم تغيراتهما في المنحنيات التالية:



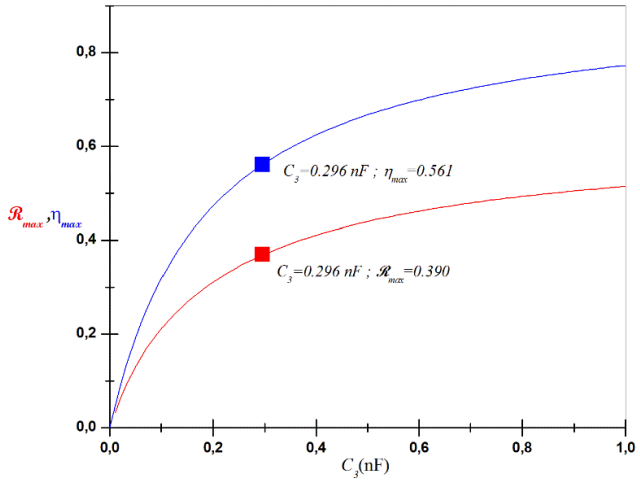
الشكل (10.2): تغير النسبة المحولة و المردود الطاقوي العظميين للمحول السعوي بدلالة سعة المكثفة C_1

تشير النقطتان المميزتان إلى قيمتي النسبة المحولة والمردود الطاقوي العظميين في تركيبنا المنجز حيث $C_1 = 2.31\ nF$



الشكل (11.2): تغير النسبة المحولة و المردود الطاقوي العظميين للمحول السعوي بدلالة سعة المكثفة C_2

تشير النقطتان المميزتان إلى قيمتي النسبة المحولة والمردود الطاقوي العظميين في تركيبنا المنجز حيث $C_2 = 0.205\ nF$



الشكل(12.2): تغير نسبة الجهد المحولة و المردود الطاقوي العظميين للمحول السعوي بدلالة سعة المكثفة C_3

تشير النقطتان المميزتان إلى قيمتي النسبة المحولة والمردود الطاقوي العظميين في تركيبنا المنجز حيث $C_3 = 0.296\ nF$

الفصل الثالث

الدراسة التجريبية للمحولات السعوية

الفصل الثالث:الدراسة التجريبية للمحولات السعوية

تمهيـــــــــد:

تتوقع الدراسة النظرية السابقة أن المحول السعوي يمكنه نقل الطاقة الكهربائية من المولد إلى الحمولة، غير أن نسبة الجهد المحولة و المردود الطاقوي له يتغيران بدلالة تواتر المولد و مقاومة الحمولة. نهدف في المرحلة الأولى من هذا الفصل إلى التأكد تجريبيا من هذه النتائج. أما في المرحلة الثانية سنستعمل الرمل كعازل بين مكثفات المحول السعوي، و ذلك لقياس المقاومية و ثابت العزل الكهربائيين للرمل، و دراسة تأثير ذلك على المردود الطاقوي و نسبة الجهد المحولة.

I. المحولات السعـويـة الفراغيـــة:

1.1 الأدوات المستعملة:

تتكون الدارة المدروسة من:

أ) **محول سعوي**: و هو كما يظهر في الشكلين (1.3) ، (2.3)

الشكل (1.3): صورة جانبية للمحول السعوي

الشكل (2.3): صورة للجزء العلوي من المحول السعوي المنجز

ب) منبع للطاقة الكهربائية:و هو مولد جهد ذو تواتر متغير (GBF) الشكل (3.3).

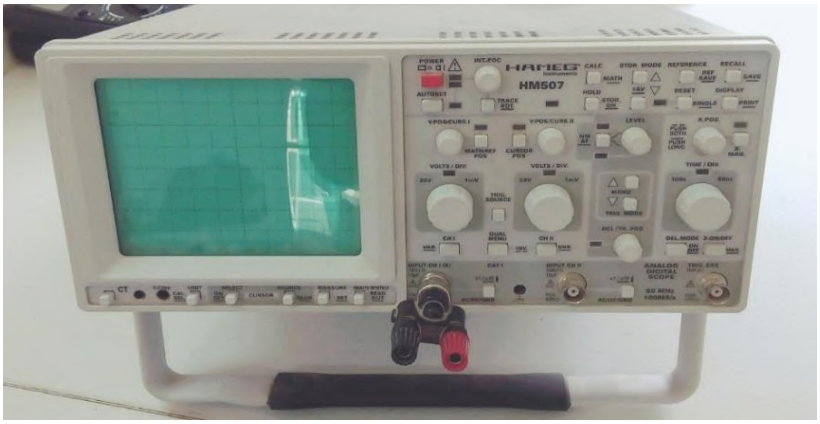
الشكل (3.3): مولد التواترات المنخفضة (GBF) المستعمل في الدراسة

ج) الحمولة: ممثلةً في ناقل أومي ذي مقاومة R يُمكن تغيرها الشكل (4.3).

الشكل (4.3): ناقل أومي ذو مقاومة متغيرة

أما أجهزة القياس المستعملة فهي:

أ) راسم الاهتزاز المهبطي: و هو كما يظهر في الشكل (5.3)، أستخدم لقياس التوتر بين طرفي المولد ΔV_1 و بين طرفي الحمولة ΔV_2.



الشكل (5.3): راسم الاهتزاز المهبطي المستعمل في قياس التوتّرات

ب) جهازآمبيرمتر: الموضح في الشكل (6.3)، لقياس شدتي التيار المار في المولد I_1 و التيار المار في الحمولة I_2.

الشكل(6.3): جهاز الأمبيرومتر

ج) أجهزة متعددة القياسات: إذْ تستعمل لقياس سعات المكثفات (الفارادمتر)، و كذا لقياس المقاومة (الأوم متر)، الشكل (7.3)، و ذلك نظرا للكفاءة التي أبدياها من حيث الدقة و المعايير المطلوبة تجريبيا.

الشكل (7.3): جهازان متعددا القياسات: المستعمل كفرادمتر (يمين)، المستعمل كأوم متر (يسار)

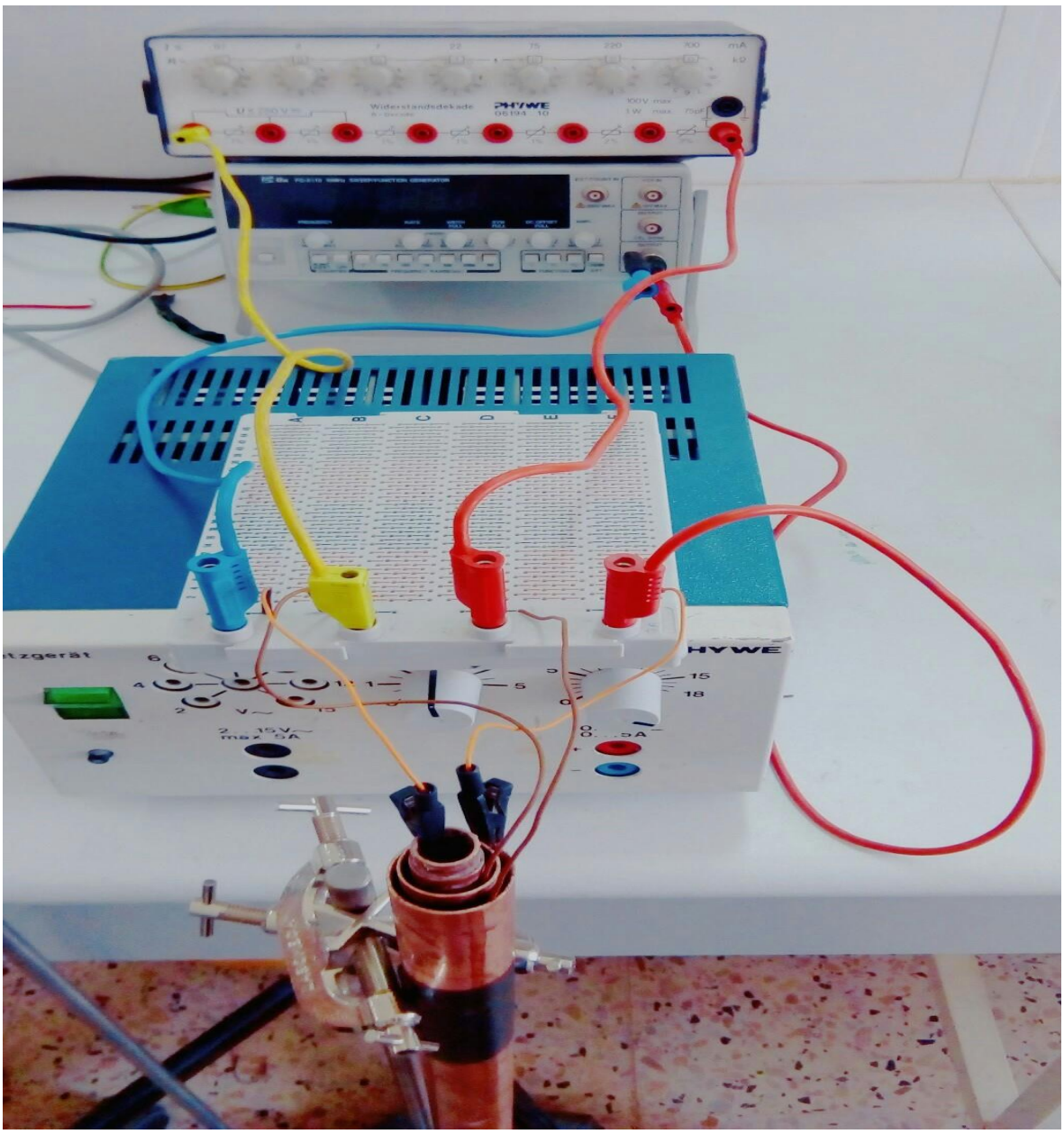
2.1 تغيرات نسبة الجهد المحولة η و المردود الطاقوي $\mathfrak{R}$ للمحول السعوي الفراغي بدلالة تواتر المنبع w:

قبل الشروع في قياس التوترات و التيارات نقيس سعة مكثفات المحول السعوي المنجز، و لنقارنْها مع السعات المتوقعة نظريا، نلخص هذه النتائج في الجدول التالي:

الجدول (1.3): القيم النظرية و التجريبية لسعة مكثفات المحول السعوي المنجز

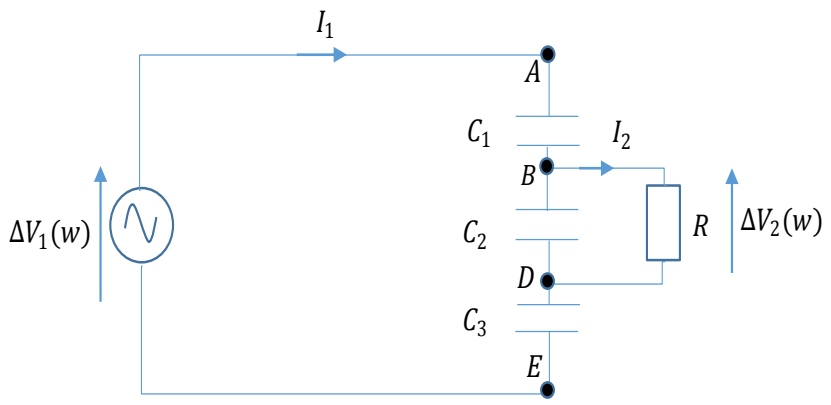
المكثفة	$C_1(nF)$	$C_2(nF)$	$C_3(nF)$
نظريا	2.31	0.205	0.296
تجريبيا	2.29 ± 0.05	0.200 ± 0.006	0.290 ± 0.011

نحقق التركيب التجريبي، و ذلك بربط القطبين (1) و (4) للمحول السعوي المنجز بطرفي المولد (المدخل)، و نوصل القطبين (2) و (3) بالحمولة (المخرج) كما يوضح الشكل (8.3).



الشكل (8.3): التركيب التجريبي المنجز لقياس نسبة الجهد و المردود الطاقوي المحولين للحمولة

يمكن تمثيل التركيب التجريبي السابق بدارة كهربائية موضحة في الشكل (9.3) التالي:



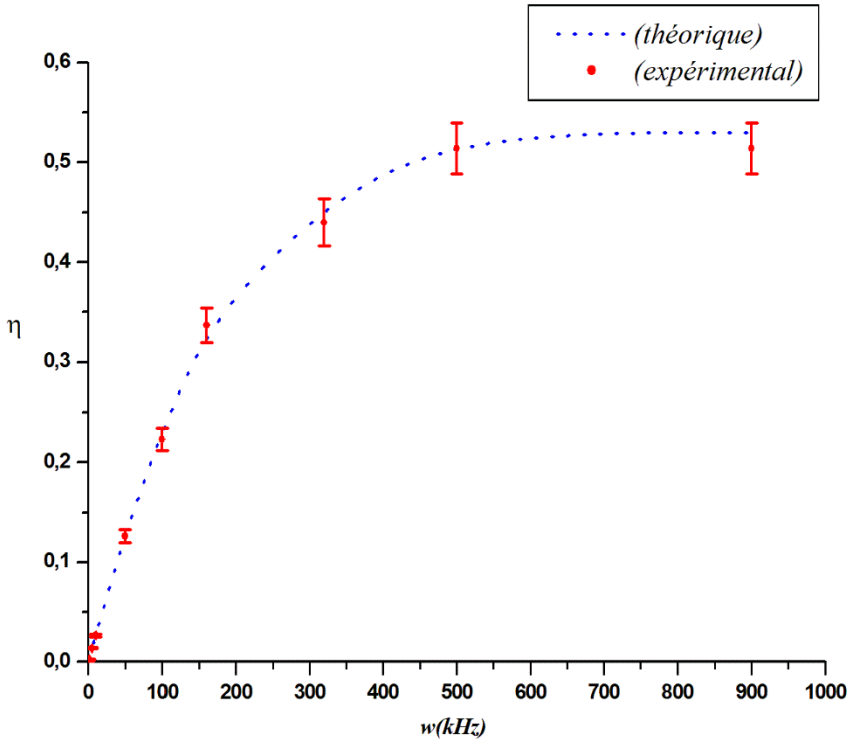
الشكل (9.3): الدارة الكهربائية المنمذجة للمحول السعوي

نثبت القيمة العظمى لتوتر المولد في القيمة $\Delta V_1 = 10V$، و نغير في كل مرة قيمة التواتر W مع إجراء قياس للمقادير ΔV_2، I_2، I_1، و ذلك من أجل قيمة ثابتة لمقاومة الحمولة R قدرها $10k\Omega$، ثم ندون النتائج في الجدول:

الجدول (2.3): قيم الجهود و التيارات المقاسة و النسبة المحولة و المردود الطاقوي المحسوبتين عند تواترات مختلفة للمولد

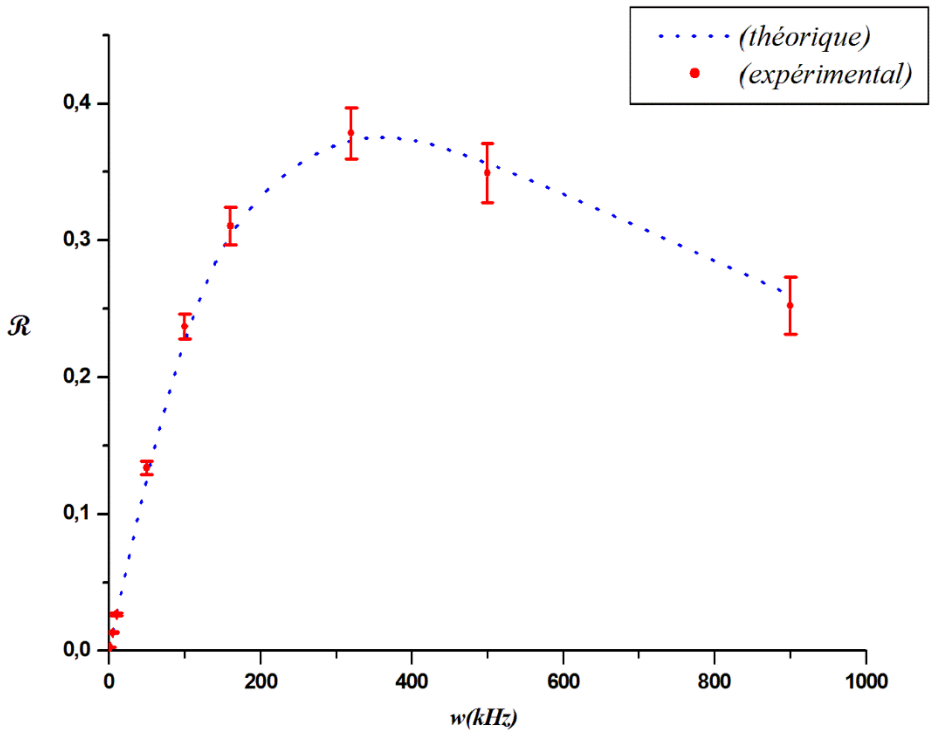
$w(kHz)$	$R = 10k\Omega$				
	$\Delta V_2(V)$	$I_1(\mu A)$	$I_2(\mu A)$	η	$\Re$
0.5	0.0134±0.0004	1.0±0.1	1.33±0.04	0.00134±0.00008	0.0013±0.0001
1	0.0257±0.0008	3.0±0.1	2.75±0.08	0.0026±0.0001	0.0026±0.0002
5	0.134±0.004	5.0±0.1	13.4±0.4	0.0134±0.0008	0.013±0.001
10	0.257±0.008	13±1	25.7±0.8	0.026±0.001	0.026±0.002
50	1.30±0.04	26±1	130±4	0.130±0.008	0.13±0.01
100	2.33±0.07	162±5	232±7	0.23±0.01	0.23±0.02
160	3.4±0.1	240±10	342±10	0.34±0.02	0.32±0.02
320	4.6±0.1	550±20	460±10	0.46±0.03	0.39±0.03
500	5.3±0.1	1250±30	526±15	0.53±0.03	0.36±0.03
900	5.3±0.2	2360±70	535±16	0.53±0.03	0.26±0.02

نرسم المنحنى التجريبي لتغير نسبة الجهد المحولة η بدلالة تواتر المولد w من أجل قيمة ثابتةٍ للحمولة السابقة، ثم لنقارنْها في المعْلَم نفسه مع المنحنى النظري، كما بالشكل (10.3):



الشكل (10.3): القيم التجريبية و المنحنى النظري لنسبة الجهد المحولة بدلالة تواتر المولد

كما نرسم المنحنى التجريبي لتغير المردود الطاقوي $\mathfrak{R}$ بدلالة تواتر المولد w من أجل قيمة ثابتةٍ للحمولة السابقة، ثم لنقارنْها في المعْلَم نفسه مع المنحنى النظري، كما بالشكل (11.3):



الشكل (11.3): القيم التجريبية و المنحنى النظري للمردود الطاقوي بدلالة تواتر المولد

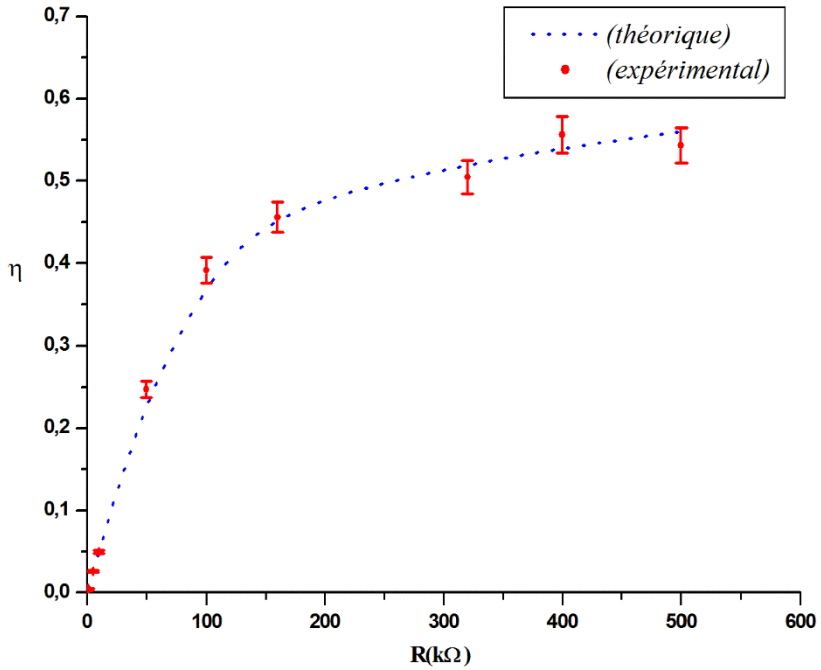
3.1 تغيرات النسبة المحولة η و المردود الطاقوي $\Re$ للمحول السعوي الفراغي بدلالة مقاومة الحمولة R:

نثبت القيمة العظمى لتوتر المولد في القيمة $\Delta V_1 = 10V$، و لنغيرْ في كل مرة مقاومة الحمولة R و نقيس المقادير ΔV_2، I_2، I_1، و ذلك من أجل قيمة ثابتة لتواتر المولد قدرها $20\ kHz$، ثم نسجل النتائج في الجدول:

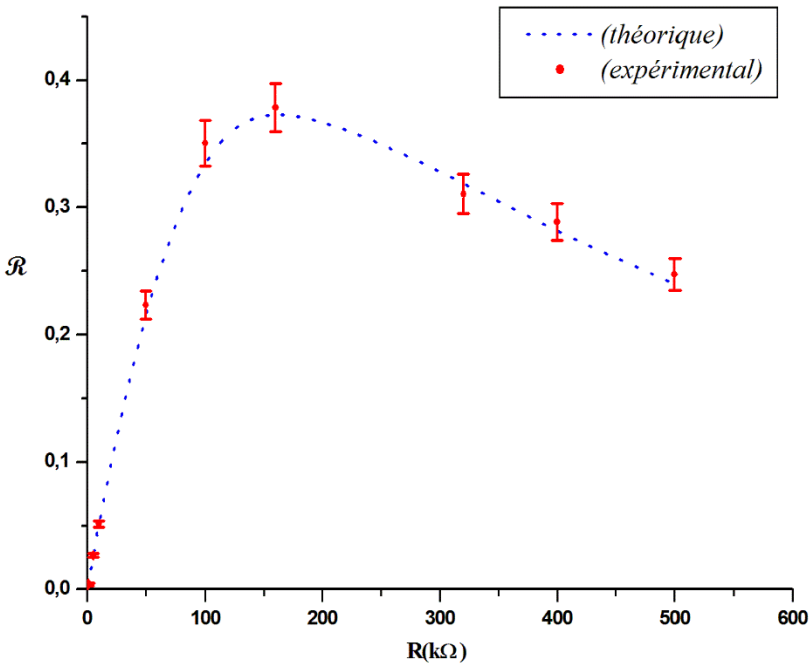
الجدول (3.3): قيم الجهود و التيارات المقاسة و النسبة المحولة و المردود الطاقوي المحسوبتين عند مقاومات مختلفة للحمولة

$R(k\Omega)$	$w = 20\ kHz$				
	$\Delta V_2(V)$	$I_1(\mu A)$	$I_2(\mu A)$	η	$\Re$
0.5	0.0268±0.0008	54±2	53±2	0.0027±0.0002	0.0026±0.0003
1	0.052±0.002	50±2	51±2	0.0052±0.0003	0.0052±0.0004
5	0.267±0.008	54±2	53±2	0.0267±0.002	0.026±0.002
10	0.51±0.02	50±2	51±2	0.051±0.003	0.053±0.004
50	2.42±0.07	50±2	48±1	0.24±0.01	0.23±0.02
100	3.8±0.1	39±1	37±1	0.38±0.02	0.35±0.03
160	4.7±0.1	36±1	30±1	0.47±0.03	0.39±0.03
320	5.2±0.2	26±1	16.3±0.5	0.52±0.03	0.32±0.02
400	5.4±0.2	26±1	13.5±0.5	0.54±0.03	0.28±0.02
500	5.6±0.2	26±1	11.2±0.3	0.56±0.03	0.24±0.02

نرسم المنحنى التجريبي لكلٍّ من تغير النسبة المحولة η الشكل (12.3)، و المردود الطاقوي $\Re$ الشكل (13.3)، بدلالة مقاومة الحمولة R من أجل قيمة التواتر السابقة في المعلم نفسه مع المنحنى النظري:



الشكل (12.3): القيم التجريبية والمنحنى النظري لنسبة الجهد المحولة بدلالة مقاومة المحولة



الشكل (13.3): القيم التجريبية و المنحنى النظري للمردود الطاقوي بدلالة مقاومة الحمولة

II. المحوّلات السعوية ذات العازل الرملي (المحوّلات السعوية الرملية):

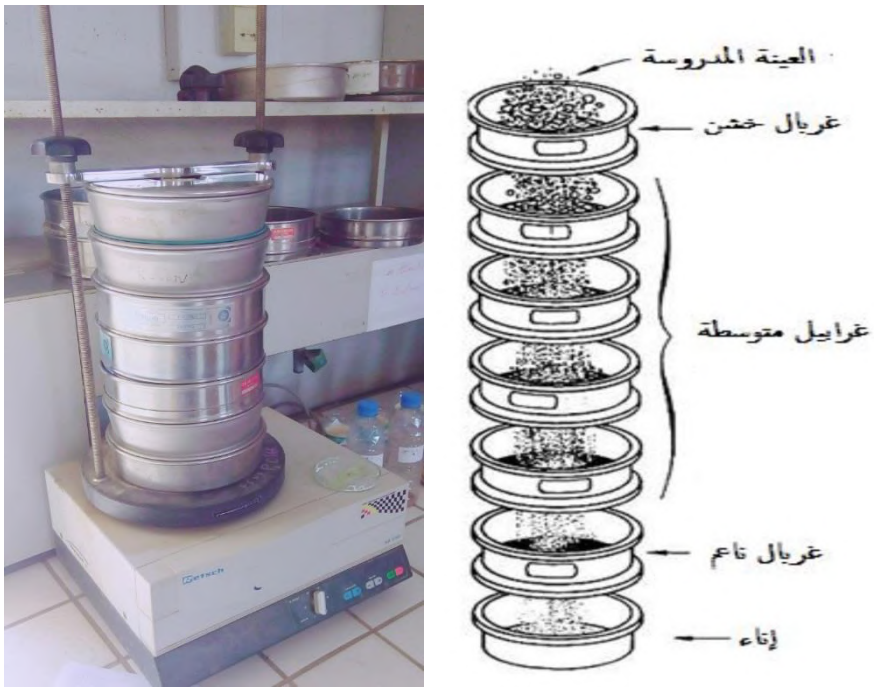
1.2 تحضـــير عيـــنة الرمـــل:

أُخِذَتْ عينة رمل خامة من أحد كثبان منطقة سيدي خويلد التابعة لولاية ورقلة. تُعتبر هذه الكثبان جزءًا من العرق الشرقي الكبير، و تقع بالتقريب عند الإحداثيات الجغرافية $N\ 31°\ 59'23"$ ، $E\ 5°\ 26'26.6"$

نُظّفتْ آلة الطحن الموضحة في الشكل (14.3) و هُيِّئتْ لاستخدامها لسحق عينة الرمل، و قد ضبطنا قطر ممر الحبيبات داخل الآلة على القيمة $d = 0.2mm$.

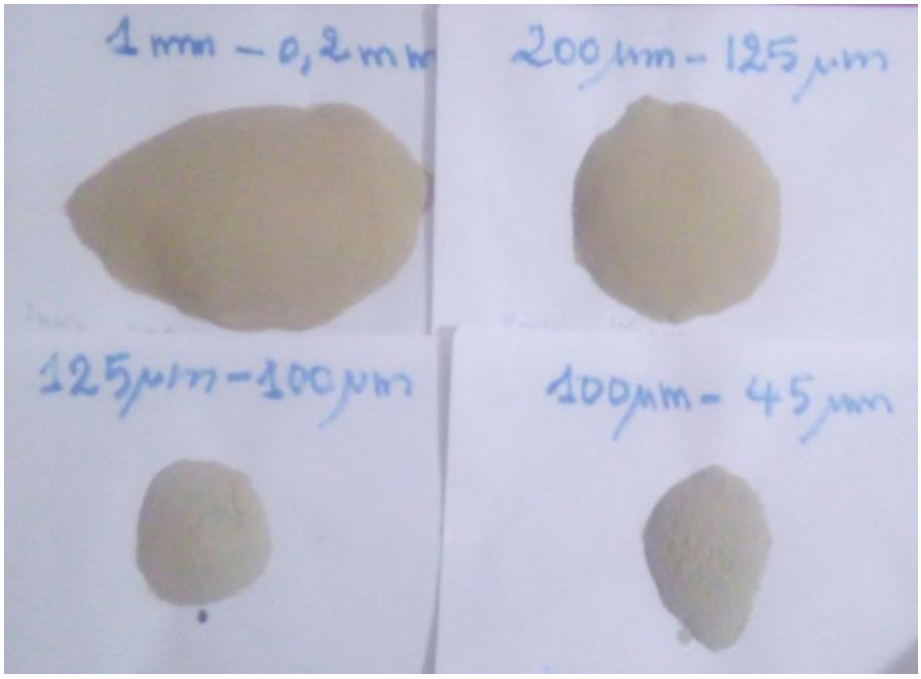
الشكل (14.3): الجهاز المستعمل في سحق عينة الرمل

بعد الحصول على مسحوق الرمل قمنا بغربلته بالجهاز الموضح في الشكل (15.3)، حيث استعملنا غرابيل ذاتَ ثقوب مختلفة الأقطار كما يلي: $d = (1 - 0.2 - 0.125 - 0.1 - 0.045)\ mm$.



الشكل (15.3): الجهاز المستعمل في غربلة مسحوق الرمل

أفرزت الغربلة تقسيم مسحوق الرمل إلى أربعة عينات مختلفة فيما بينها من حيث أقطار حبيباتها، و هي موضحة كما بالشكل (16.3).



الشكل (16.3): عينات الرمل المستخلصة من غربلة المسحوق

2.2 إنجاز مكثفة ذات عازل رملي:

في الخطوة الأولى أُستعمِل قمع ورقي لحشو المكثفة المشَكَّلة بالاسطوانتين (3) و (4) بعينة الرمل ذات القطر الحبيبي $0.2\ mm < d < 1\ mm$، و قد تم التكديس من خلال عملية الطرق المرافقة للحشو إلى كثافة حجمية للرمل قدرها:

$$\varrho = \frac{m}{Volume} = \frac{m}{\pi l(r_f{}^2 - r_i{}^2)} = \frac{0.207\ kg}{6.78 \times 10^{-4}\ m^3} = 305\ kg.m^{-3} \quad (1.3)$$

في الخطوة الثانية تم حشو المكثفة المشكّلة بالأسطـــوانتين (2) و(3) بعينة الرمـل ذات القطر الحبيبي $0.125\ mm < d < 0.2\ mm$، و قد كُدست هذه العينة إلى كثافة حجمية قدرها:

$$\varrho = \frac{m}{Volume} = \frac{m}{\pi l(r_f{}^2 - r_i{}^2)} = \frac{0.220\ kg}{5.85 \times 10^{-4}\ m^3} = 376\ g.m^{-3} \quad (2.3)$$

تجدر الإشارة إلى أن الخطوتين الأولى و الثانية تفصلهما عملية قياس السعات و النسبة المحولة و المردود الطاقوي للمحول السعوي بدلالة تواتر المولد و مقاومة الحمولة.

نرمز فيما سيأتي لعينة الرمل ذات القطر الحبيبي $0.2\ mm < d < 1\ mm$ المحشوة داخل المكثفة C'_3 بالرمز S_3، بينما عينة الرمل ذات القطر الحبيبي $0.125\ mm < d < 0.2\ mm$ المحشوة داخل المكثفة C'_2 بالرمز S_2.

3.2 قياس الخصائص الكهربائية للرمل:

أ) قياس سعة مكثفة ذات عازل رملي و استنباط قيمة السماحية:

قمنا بقياس سعة المكثفة C'_3 باعتبار عازلها رمليًا S_3 باستعمال جهاز قياس السعات، فكانت النتائج الأولية:

الجدول (4.3): قيمة سعة المكثفة C_3 قبل استعمال الرمل S_3 و بعده

$C_3(nF)$	$C'_3(nF)$	ε_{r3}	$\varepsilon_3(pF.m^{-1})$
0.296	1.63 ± 0.04	5.50 ± 0.16	48.7 ± 1.4

أما قياس سعة المكثفة C'_2 بإعتبار عازلها رملي S_2 باستعمال نفس الجهاز أعطى النتائج الأولية التالية:

الجدول (5.3): قيمة سعة المكثفة C_2 قبل استعمال الرمل S_2 و بعده

$C_2(nF)$	$C'_2(nF)$	ε_{r2}	$\varepsilon_2(pF.m^{-1})$
0.205	1.15 ± 0.03	5.61 ± 0.17	49.7 ± 1.5

تعتبر هذه النتائج أولية، لأنه تبيّن لنا بعد ذلك أن قيم السعات، و بالتالي السماحية الكهربائية تتعلق بتواتر المولد.

ب) المقاومية الكهربائية للرمل:

تعذر علينا القياس المباشر لمقاومة العازل الرملي S_3 باستعمال جهاز قياس المقاومة، و ذلك نظرا لقيمتها الكبيرة التي تتعدى مجال قياس الجهاز، لذلك لجأنا إلى طريقة قياس غير مباشرة، حيث تم ربط المكثفة ذات العازل الرملي S_3 مع مقاومة كبيرة R على التوازي، ثُمَّ قسْنا المقاومة المكافئة لهما معا، و من ثَمَّ استنباط مقاومة العازل، فكانت النتائج:

الجدول(6.3): قيمة المقاومة المستعملة على التوازي مع الرمل S_3 والمقاومة المكافئة

$R(M\Omega)$	$R_{eq}(M\Omega)$
190	180

$$R_{S(3)} = \frac{R \times R_{eq}}{R - R_{eq}} = \frac{190 \times 180}{190 - 180} = 3420\ M\Omega \qquad (3.3)$$

باستخدام قيمة مقاومة العازل الرملي $R_{S(3)}$ و العلاقة (2.1) الواردة في الفصل الأول من هذه المذكرة أستنبطت المقاومية الكهربائية للرمل S_3 فكانت على النحو:

$$\rho_3 = \frac{s\ R_{S(3)}}{\ell} = \frac{2\pi rl}{r_f - r_i} R_{S(3)} = \frac{2\pi \times 27 \times 99cm}{(27 - 22.5)} 3420M\Omega = 12.7 \times 10^{12}\Omega.cm \qquad (4.3)$$

بالطريقة نفسها حُسبتْ مقاومة الرمل S_2:

الجدول(7.3): قيمة المقاومة المستعملة على التوازي مع الرمل S_2 و المقاومة المكافئة

$R(M\Omega)$	$R_{eq}(M\Omega)$
190	184

$$R_{S(2)} = \frac{R \times R_{eq}}{R - R_{eq}} = \frac{190 \times 184}{190 - 184} = 5826M\Omega \qquad (5.3)$$

بتوظيف العلاقة السابقة نفسها حسبنا المقاومية الكهربائية للرمل S_2 فكانت:

$$\rho_2 = \frac{s\ R_{S(2)}}{\ell} = \frac{2\pi rl}{r_f - r_i} R_{S(2)} = \frac{2\pi \times 16.5 \times 98cm}{(21.5 - 16.5)} 5826M\Omega = 11.8 \times 10^{12}\Omega.cm \qquad (6.3)$$

يمكن ملاحظة أن مقاومية الرمل S_2 أقلُّ من مثيلتها للرمل S_3. يمكن عَزْوُ ذلك إلى كون التراص في الأول ($0.125\ \text{mm} < d < 0.2\ mm$) أكثرَ منه في الثاني ($0.2\ \text{mm} < d < 1\ mm$)، ممّا يزيد التوصيل بين مكوّنات الرمل.

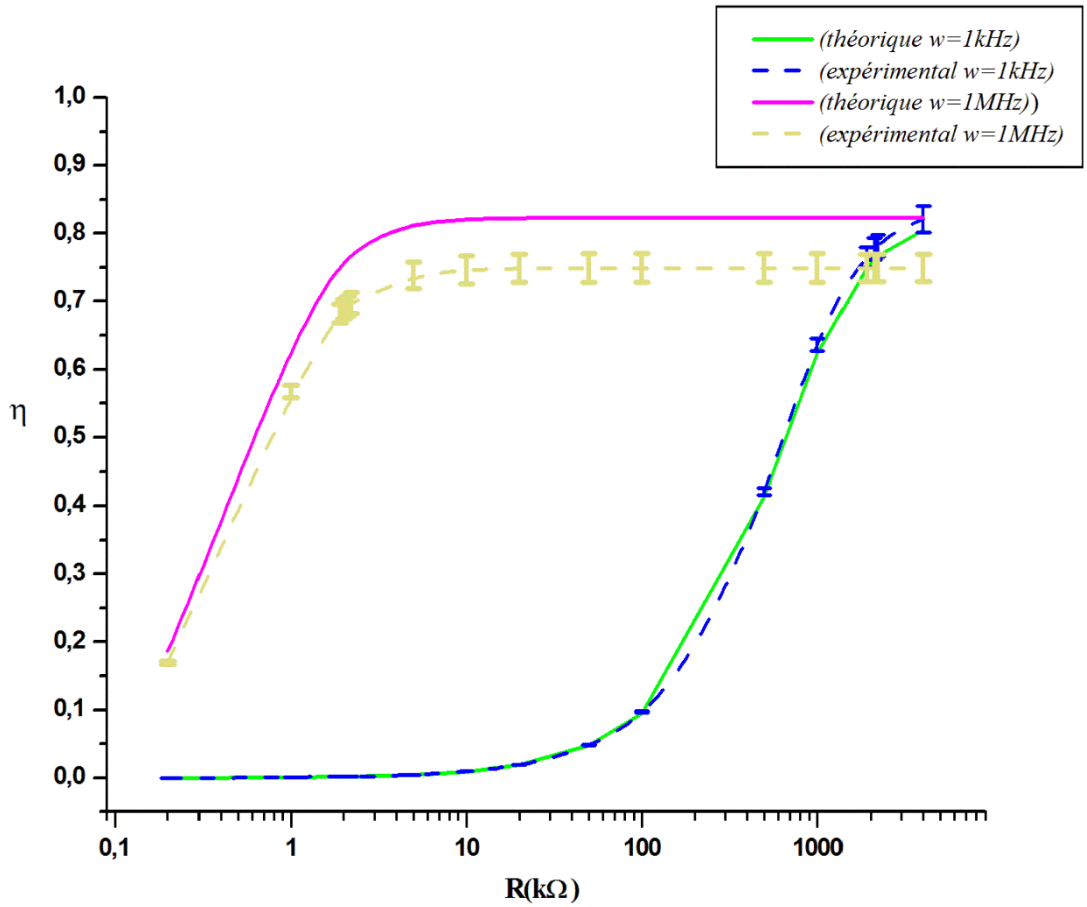
بالمقـارنة مع نتائج دكتـوراه مشري محمد العيد[4] نلاحظ أن المقاوميـــــة الكهربائية لـرمل سيـــدي خـويلد $\rho = 12 \times 10^{12}\Omega.cm$ أقلُّ مقاومية من رمل منطقة محيريزة $\rho = 585 \times 10^{12}\Omega.cm$ ببضع عشرات من الأمثال.

4.2 تأثير الرمل على تغيرات نسبة تحويل الجهد والمردود الطاقوي في المحول السعوي:

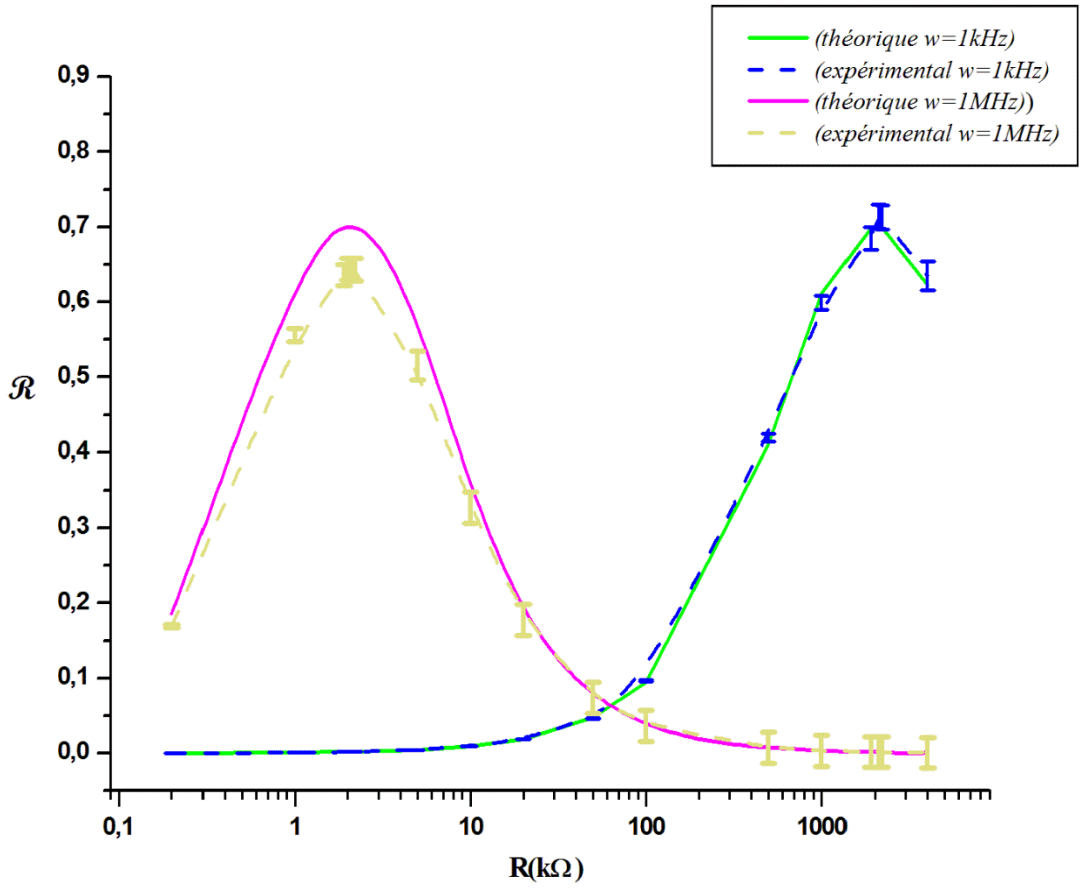
أ) الخطوة الأولى: إستعمال الرمل S_3 كعازل للمكثفة C'_3:

تغيرات نسبة الجهد المحولة η والمردود الطاقوي $\Re$ للمحول السعوي الرملي بدلالة مقاومة الحمولة R:

بالاعتماد على التركيب التجريبي المبين في الشكل (8.3) و لكن باعتبار الرمل S_3 كعازل للمكثفة C'_3، نثبت القيمة العظمى لتوتر المولد في القيمة $V_1 = 10V$، ثم لنغيرْ قيمة المقاومة R مع قياس المقادير ΔV_2، I_2، I_1، و ذلك من أجل قيمتين لتواتر المولد هما: $1kHz$، $1MHz$، بعدها نلخص النتائج برسم المنحنيات التجريبية لكل من النسبة المحولة الشكل (17.3)، و المردود الطاقوي الشكل (18.3)، بدلالة مقاومة الحمولة في معلم واحد مع المنحنيات المتوقعة نظريا.



الشكل (17.3): النتائج النظرية و التجريبية لتغيرات نسبة الجهد المحولة بدلالة مقاومة الحمولة عند تواترين مختلفين بعد استعمال الرمل S_3



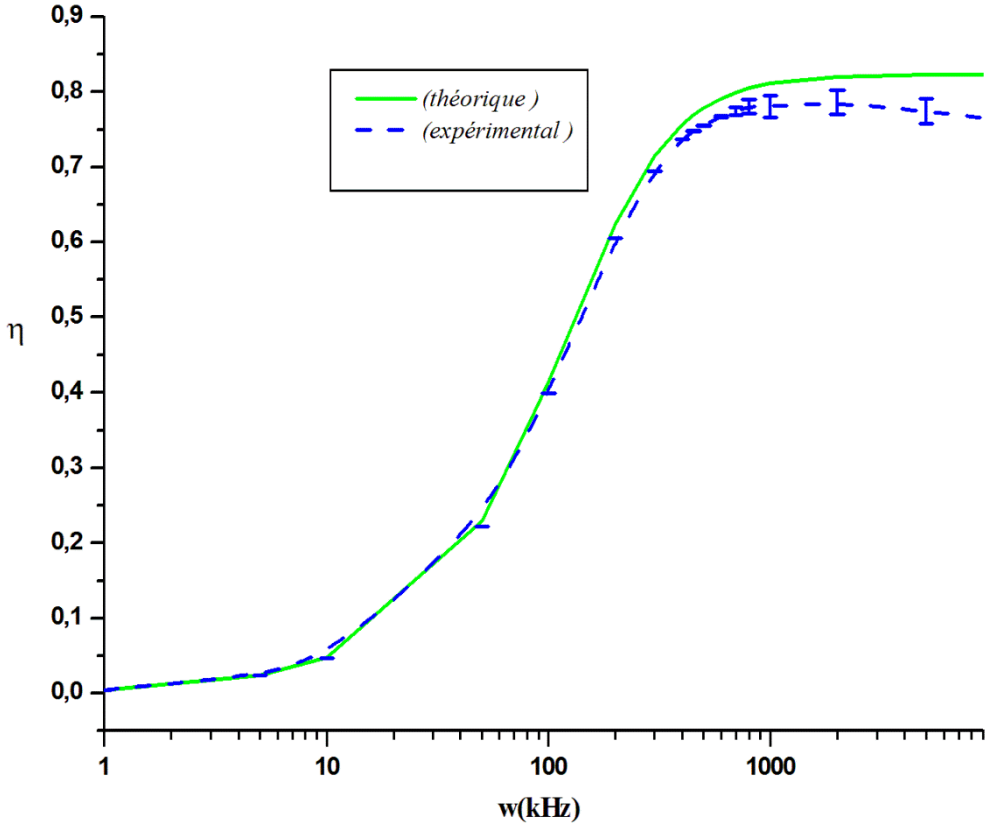
الشكل (18.3): النتائج النظرية و التجريبية لتغيرات المردود الطاقوي بدلالة مقاومة الحمولة عند تواترين مختلفين بعد استعمال الرمل S_3

يظهر توافق المنحنيين التجريبيين للنسبة المحـــولة و المـردود الطاقـوي مع المنحنييـن النظريـيْن و ذلك من أجل $w = 1kHz$، و هو أمر عادي منتظر، لكن اختلافهما من أجل $w = 1MHz$ ملفت للانتباه، و لا يمكن عزْوُه إلى ارتياب القياسات، بل يمكن تفسيره مبدئيا بارتباط سماحية العازل الرملي S_3 بتردد المولد، و بالتالي تأثير تردد المولد على سعة المكثفة C'_3.

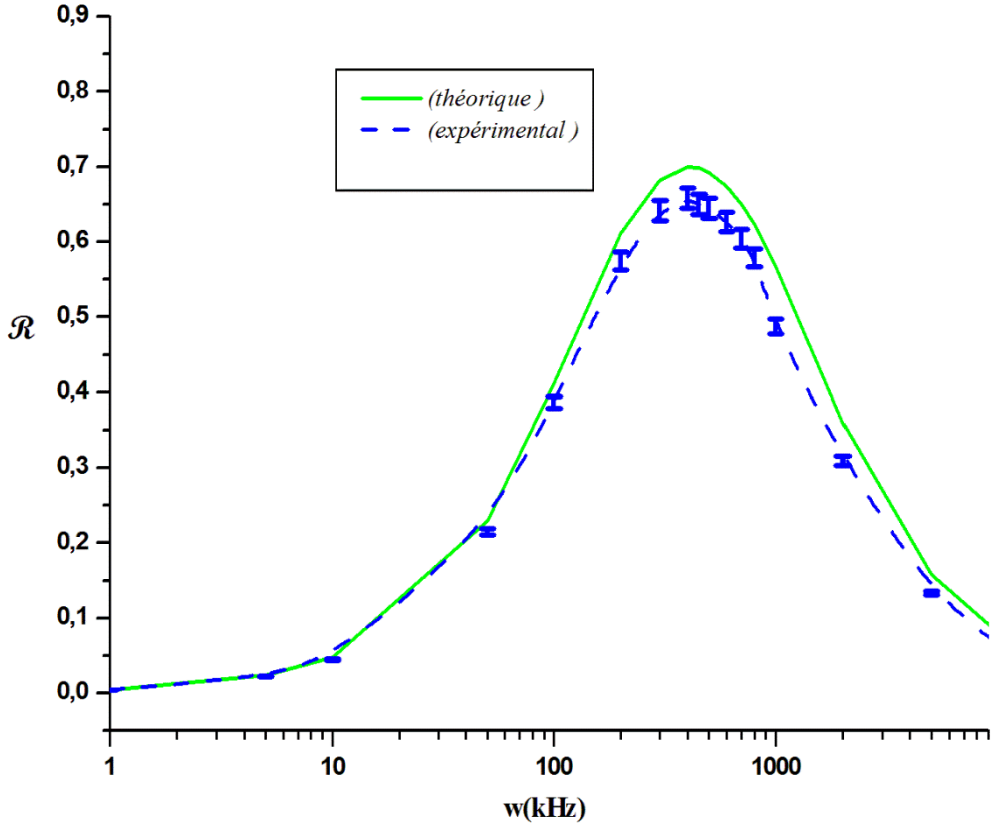
تغيرات نسبة الجهد المحولة η و المردود الطاقوي $\Re$ للمحول السعوي الرملي بدلالة تواتر المولد w:

بتحقيق التركيب التجريبي السابق، و باعتبار الرمل S_3 كعازل للمكثفة C'_3، نثبت القيمة العظمى لتوتر المولد عند القيمة $V_1 = 10V$، و لنغيرْ تواتر المولد w مع قياس المقادير ΔV_2، I_2، و I_1، و ذلك من أجل قيمة ثابتة للحمولة قدرها $R = 5k\Omega$، بعدها نلخص النتائج برسم المنحنيات التجريبية، لكل من النسبة المحولة الشكل (19.3)، و المردود

الطاقوي الشكل (20.3)، بدلالة مقاومة الحمولة في المعلم نفسه مع المنحنيات المتوقعة نظريا.



الشكل (19.3): النتائج النظرية و التجريبية لتغيرات نسبة الجهد المحولة للحمولة بدلالة تواتر المولد بعد استعمال الرمل S_3



الشكل (20.3): النتائج النظرية و التجريبية لتغيرات المردود الطاقوي بدلالة تواتر المولد بعد استعمال الرمل S_3

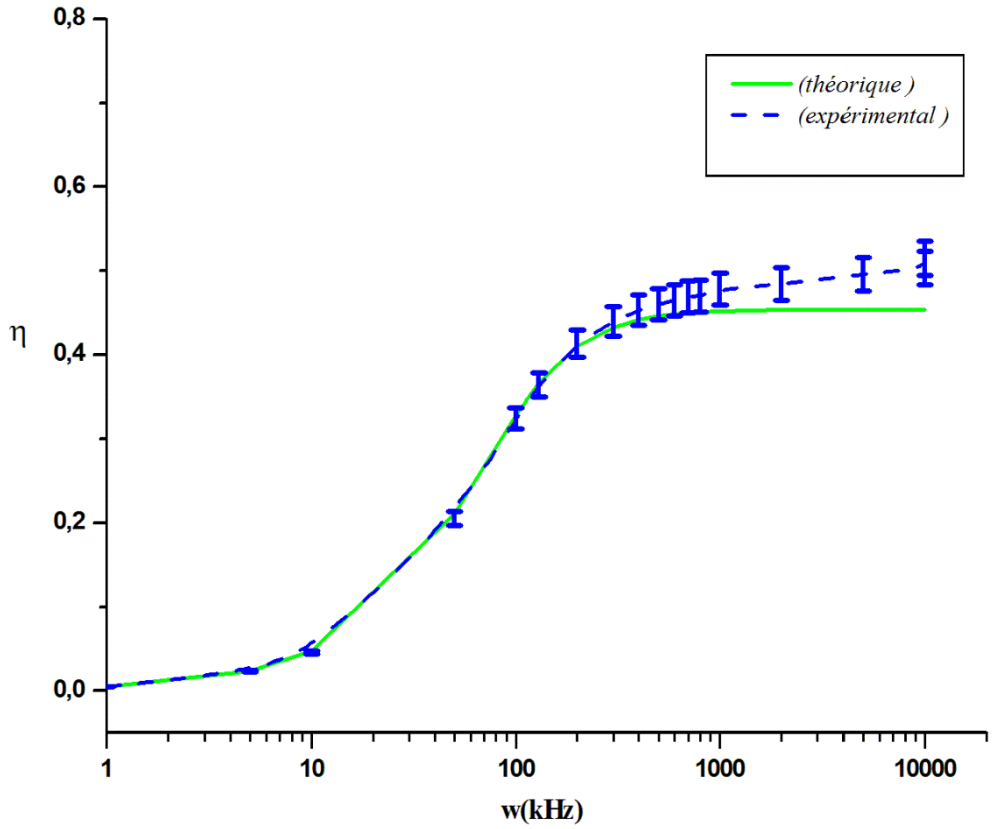
إن الاختلاف بين المنحنييْن النظري و التجريبي لتغير النسبة المحولة بدلالة تواتر المولد، و لمثيليْهما للمردود الطاقوي، و خاصة في مجال التواترات المرتفعة، لا يدع مجالا للشك في أن سماحية الرمل S_3 تتغير بتغير تواتر المولد، و هو أمر معلوم جدا لدى الفيزيائيين. سنسعى في الفصل القادم لاستنباط علاقة شبه تجريبية لذلك.

ب) الخطوة الثانية: إستعمال عينتي الرمل S_2 و S_3 كعازلين للمكثفتين C'_3 و C'_2 على الترتيب:

تغيرات النسبة المحولة η و المردود الطاقوي $\Re$ للمحول السعوي الرملي بدلالة تواتر المولد w:

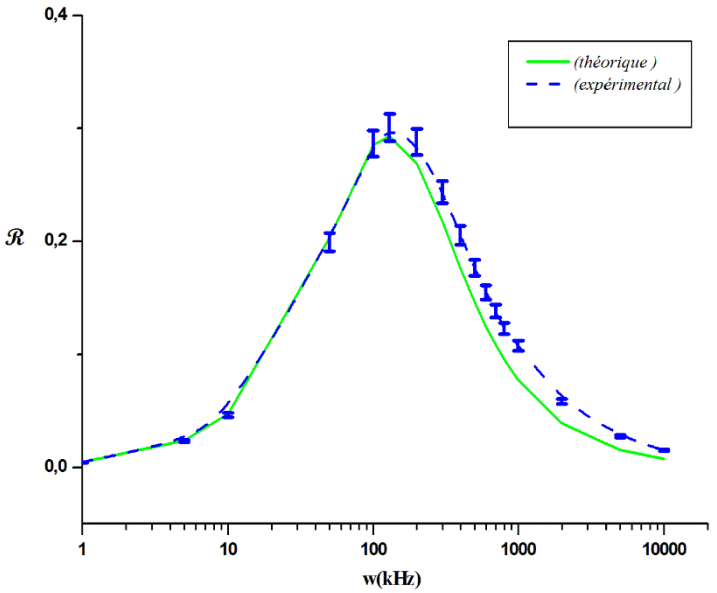
سنكتفي هنا بدراسة تغيرات النسبة المحولة η والمردود الطاقوي للمحول السعوي الرملي بدلالة تواتر المولد w، وذلك لعدم إبداء تغيير مقاومة الحمولة اختلافا بين النتائج التجريبية و النظرية، كما يظهر في الشكل (17.3).

إستنادا إلى التركيب التجريبي السابق، و باعتبار الرمل S_2 عازلًا للمكثفة C_2 و الرمل S_3 عازلًا للمكثفة C_3 نثبت القيمة العظمى لتوتر المولد عند القيمة $V_1 = 10V$، و لنغيرْ تواتر المولد w مع قياس المقادير ΔV_2، I_2، I_1، و ذلك من أجل قيمة ثابتة للحمولة قدرها $R = 5k\Omega$، ثم لنرسمْ المنحنيين التجريبي و النظري للنسبة المحولة في المعلم نفسه، الشكل(21.3).



الشكل (21.3): النتائج النظرية و التجريبية لتغيرات نسبة الجهد المحولة للحمولة بدلالة تواتر المولد بعد استعمال الرملين S_3 و S_2

و كذا للمردود الطاقوي، الشكل (22.3).

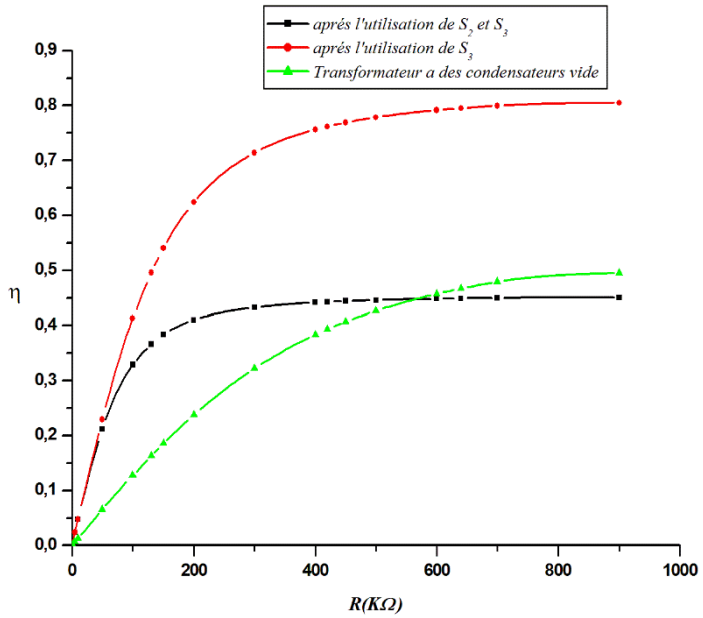


الشكل (22.3): النتائج النظرية و التجريبية لتغيرات المردود الطاقوي بدلالة تواتر المولد بعد استعمال الرملين S_3 و S_2

إن الاختلافات بين المنحنى النظري و التجريبي الظاهرة في الشكلين (21.3)، (22.3) تؤكد أن ثابت العزل يتعلق بتواتر المولد، لذلك سيتم استغلال هذه القياسات التجريبية في إيجاد دالة لسماحية الرملين S_3 و S_2 بدلالة تواتر المنبع.

5.2 تأثير استعمال الرملين S_2 و S_3 كعازلين للمكثفتين C'_2 و C'_3 على الترتيب على النسبة المحولة العظمى و المردود الطاقوي الأعظمي للمحول السعوي:

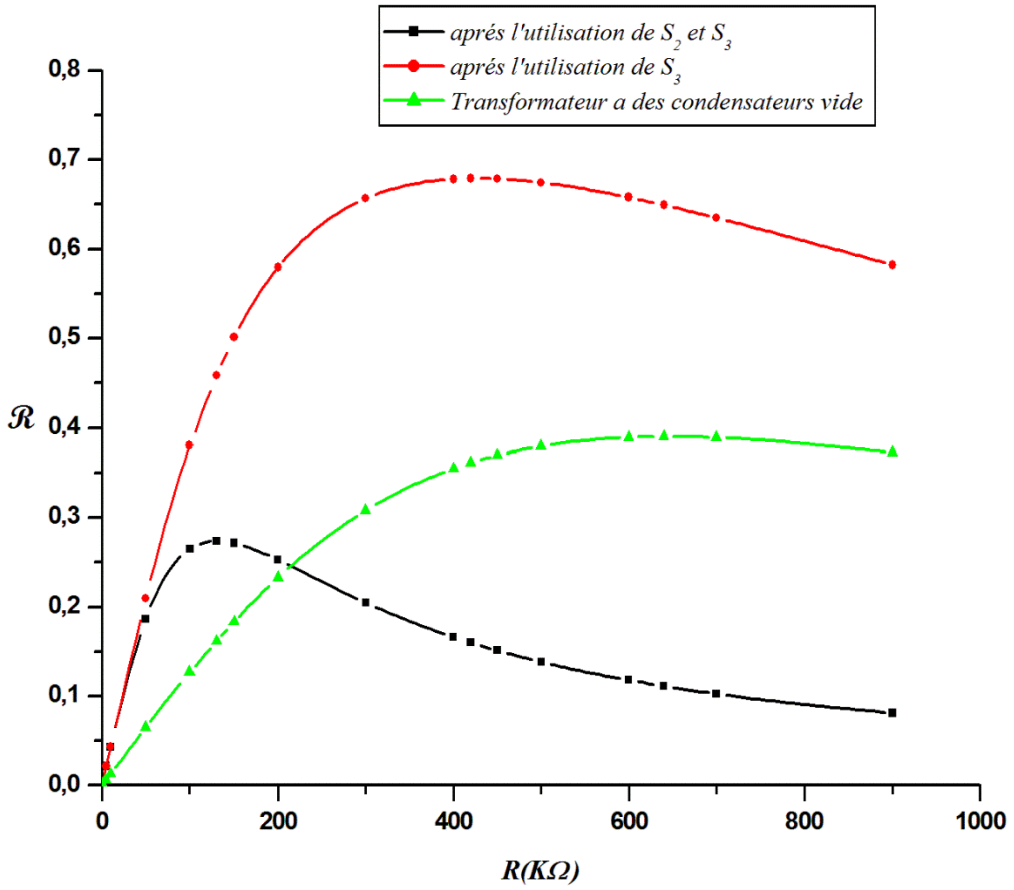
بغض النظر عن تأثير التواتر على ثابت العزل، فإن النسبة المحولة العظمى و المردود الطاقوي الأعظمي للمحول السعوي الرملي تختلفان عما كانتا عليه في المحول السعوي الفراغي، فمن أجل تواتر ثابت رسمنا المنحنيات التجريبية للنسبة المحولة قبل استعمال الرمل و بعده بدلالة مقاومة الحمولة فكانت النتائج كما يظهرها الشكل (23.3)



الشكل(23.3): تغيرات النسبة المحولة بدلالة مقاومة الحمولة قبل استعمال الرمل و بعده كعازل للمكثفات

نلاحظ من خلال منحنيات الشكل (23.3)، أن استعمال الرمل S_3 كعازل للمكثفة الجانبية C'_3 عَمِل على مضاعفة سعتها، و هو ما جعل قيمة النسبة الجهد المحولة تزداد، في حين نلاحظ تناقص قيمتها عند استعمال الرمل S_2 كعازل للمكثفة الوسطى C'_2 و التي ضوعفت سعتها، و هذه الملاحظة تتماشى مع ما ورد في الشكلين (11.2) و(12.2).

و لمعرفة تأثير الرمليْن S_2 و S_3 على المردود الطاقوي للمحول السعوي رسمنا المنحنيات التجريبية لها بدلالة مقاومة الحمولة قبل استعمالهما كعازلين للمكثفتين C_2 وC_3 على الترتيب و بعدهما، فكانت النتائج كما يوضح الشكل(24.3).



الشكل(24.3): تغيرات المردود الطاقوي بدلالة مقاومة الحمولة قبل وبعد استعمال الرمل كعازل للمكثفات

يتجلى من خلال منحنيات الشكل (24.3) أن استعمال الرمل S_3 جعل المردود الطاقوي يتضاعف، وذلك لتزايد سعة المكثفة C'_3، غير أن استعمال الرمل S_2 أنقص قيمة المردود الطاقوي، مع تغير قيمة المقاومة التي توافق المردود الاعظمي، وهذا يتوافق مع ما يظهره الشكلان (11.2) و(12.2) و العبارة (34.2)

الفصل الرابع

تحليل النتائج التجريبية ومقارنتها بالنظرية

الفصل الرابع: تحليل النتائج التجريبية و مقارنتها مع النظرية

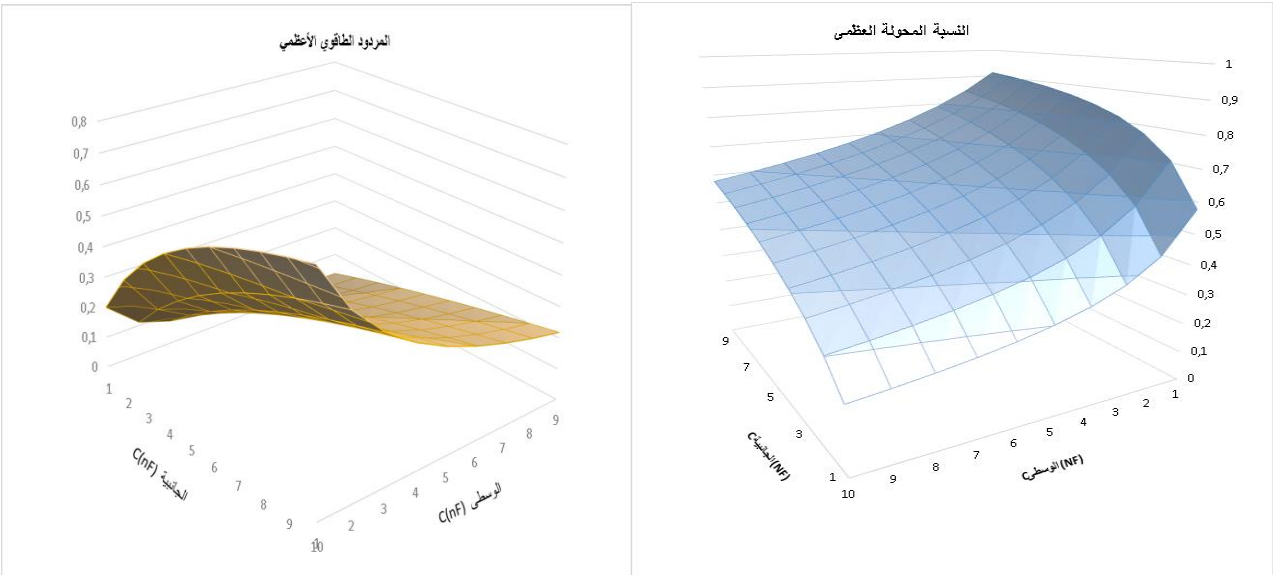
تمهيـــــــــــد:

في كل العلوم التجريبية قد تتفق القياسات التجريبية مع النتائج المتوقعة حسابيا باعتبارات محددة، و قد تختلف عنها، فيسمح لنا الاتفاق بالتأكد من صحة النموذج النظري المستعمل للدراسة و اعتباراته، و من ثمة تعميمه لدراسة ظواهر مشابهة، أما في حالة الاختلاف فإننا سنسعى للبحث عن تعديلات على النموذج النظري حتى يتلاءم مع نتائج التجربة.

قمنا في الفصل الثاني بالدراسة النظرية لكل من النسبة المحولة و المردود الطاقوي بدلالة تواتر المولد و مقاومة الحمولة، و ذلك في المحولات السعوية بصفة عامة، ثم أجرينا في الفصل الثالث القياسات التجريبية اللازمة لهذين المقدارين في المحولات السعوية الفراغية و الرملية، فما الذي يمكن استخلاصه من خلال تحليل هذه النتائج و مقارنتها؟

I. المحول السعوي الفراغي:

لقد أبدت النتائج التجريبية للنسبة المحولة و المردود الطاقوي للمحول السعوي الفراغي توافقا مع النتائج المتوقعة نظريا كما يظهر في الأشكال (10.3)، (11.3)، (12.3) و(13.3)، و هذا ما يؤكد صحة الإعتبارات التي بني عليها الحساب النظري، و بالتالي إمكانية تعميم الدراسة على المحولات السعوية الفراغية المصنوعة بطريقة بسيطة تتمثل في جعل مجموعة أسطوانات متمحورة يفصل بينها عازل هو الهواء، بحيث يمكننا التحكم في النسبة المحولة العظمى و المردود الطاقوي الأعظمي من خلال اختيارٍ مناسبٍ لأنصاف أقطار الأسطوانات كما يوضح الشكل(1.4)



الشكل (1.4): تغيرات نسبة الجهد المحولة والمردود الطاقوي العظميين بدلالة سعة مكثفات التركيب

إن المحولات السعوية تختلف عن المحولات الحثية، إذْ أن نسبتها المحولة ومردودها الطاقوي يتعلقان بتواتر المولد و مقاومة الحمولة، على عكس المحولات الحثية، و التي يكون فيها هذان المقداران ثابتين، وهذا ما يجعلها حلا لمشاكل تكنولوجية إن استدعت الحاجة، فقد تبين خلال الدراسة التجريبية أنها تتميز بـــ:

1- ليس بها أي ضياع حراري نظرا لعدم تشكلها من نواقل أومية.

2- لا تصدر المحولات السعوية ضجيجا أثناء اشتغالها كما هو الحال في المحولات الحثية.

3- خلال عمل المحولات السعوية لا وجود للتيارات الدوامية المبددة للطاقة والتي تعاني منهما المحولات الحثية.

4- تتميز المحولات السعوية بتكلفة تصنيع رخيصة و حجم صغير مقارنة بالمحولات الحثية.

5- إن المحولات السعوية بطبيعتها تحد من التيارات، و لذلك فالدارات المستقصرة لا تضرُّ بها، و هذا ما يجعلها تتميز بمدة صلاحية كبيرة مقارنة بالمحولات الحثية.

رُغم كل هذه المزايا التي أبدتها المحولات السعوية تجريبيا، والتي تؤهلها لتعويض المحولات الحثية الخافضة في العديد من الدارات الإلكترونية، إلا أنها تبقى عاجزة عن تعويض المحولات الحثية الرافعة للجهد

من الناحية المنهجية فإن هذا التوافق يتيح لنا فرصة التأكد من كفاءة أجهزة القياس المستعملة في البحث، و بالتالي الاعتماد عليها، و إرجاع الاختلافات التجريبية مع النظرية فيما سيأتي إلى خطأ الاعتبارات النظرية، لا إلى ارتيابات أجهزة القياس.

II. المحولات السعوية الرملية:

1.2 المرحلة الأولى: إستعمال الرمل S_3 كعازل رملي للمكثفة C_3:

أ) المقاومية الكهربائيـــة للرمـــل S_3:

تظهر نتائج القياس الموضحة العبارة (4.3) أن الرمل S_3 في حالته الطبيعية ذومقاومية كهربائية عالية في حدود $13 \times 10^{12}\Omega.cm$،وهذا ما سمح لنا باستعماله كعازل للمكثفة C_3، وتعود مقاوميته الكبيرة إلى احتوائه على تراكيب بلورية عازلة موضحة في الجدول (1.4).

الجدول (1.4): المقاومية الكهربائية لأغلب مكونات الرمل[4].

المقاومية $\Omega.cm$	المادة
$4 \times 10^{12} - 2 \times 10^{12}$	الكوارتز
1.21×10^{14}	الجبس
$3.5 \times 10^{3} - 10^{9}$	**Hematite**
10^{11}	**Anhydrite**
6.67×10^{12}	**Wollastonite**

ب)ثابت العزل الكهربائي للرمل S_3:

تقودنا نتائج القياس باستعمال جهاز الفارادمترالموضحة في الجدول (4.3) إلى أن ثابت العزل الكهربائي للرمل S_3 في حالته الطبيعية تقدر بالقيمة $\varepsilon_3 = 5.5$، وتعود هذه القيمة إلى احتواء الرمل على مركبات كيميائية قطبية كالكوارتز، الكالسيت، أكسيد الألمونيوم[4].

إن الاختلاف المسجل بين النتائج التجريبية والتوقعات النظرية لنسبة الجهد المحولة والمردود الطاقوي في الشكلين (17.3) و(18.3)، لا يمكن إرجاعه إلى ارتياب القياسات التجريبية، بل يفسر بكوْن ثابت العزل الكهربائي للرمل S_3 متعلقًا بتواتر الحقول الكهرمغناطيسية الناشئة فيه وهذا ما لم يؤخذ في الحسبان في الدراسة النظرية.

لدراسة كيفية ارتباط ثابت عزل الرمل S_3بالتردد سنستعين بالقيم التجريبية للنسبة المحولة و المردود الطاقوي (الشكلان (17.3) و(18.3))، و الموضحة في الجدول (2.4).

الجدول(2.4): القيم التجريبية لنسبة الجهد المحولة والمردود الطاقوي عند كل تواتر للمولد بعد استعمال الرمل S_3

$w(kHz)$	η_{exp}	$\Re_{exp}$
1	0.0048	0.0048
5	0.0236	0.0236
10	0.0466	0.0466
50	0.222	0.222
100	0.399	0.396
200	0.605	0.592
300	0.695	0.664
400	0.737	0.682
450	0.748	0.679
500	0.755	0.672
600	0.767	0.654
700	0.774	0.629
800	0.781	0.604
1000	0.780	0.545
2000	0.786	0.345
5000	0.774	0.148
10000	0.764	0.0711

بما أن العلاقة (8.2) تسمح لنا بإيجاد عبارة النسبة المحولة بدلالة سعة مكثفات التركيب المنجز وتواتر المنبع ومقاومة الحمولة فإن المعالجة الرياضية لها ستمكننا من استخراج عبارة ثابت العزل الرملي S_3 بدلالة المقادير السابقة و كذا بدلالة النسبة المحولة، والتي تكون كالشكل:

$$\varepsilon_{r3exp} = -\frac{\eta\, C_1}{C_3}\frac{\eta\left(1+R^2C_2w^2(C_1+C_2)\right) \pm RC_1w\sqrt{(RC_2w)^2-\eta^2+1}}{R^2w^2\left(\eta^2(C_1+C_2)^2-{C_1}^2\right)+\eta^2} \qquad (1.4)$$

وبتعويض القيم العددية للتركيب المنجزوجعل ثابت العزل دالة للتواتر $w(Hz)$ والنسبة المحولة ηفقط نجد:

$$\varepsilon_{r3exp} = -7.8\,\eta\,\frac{\eta(1+1.29\times10^{-11}w^2)+1.15\times10^{-5}w\sqrt{1.05\times10^{-12}w^2+1-\eta^2}}{1.58\times10^{-10}w^2\eta^2-1.33\times10^{-10}w^2+\eta^2} \qquad (2.4)$$

بالطريقة نفسها فإن التعامل مع العلاقة (12.2) للمردود الطاقوي سينتج لنا عبارة ثابت العزل الرمليS_3 بدلالة المردود الطاقوي و تواتر المنبعكما يلي:

$$\varepsilon_{r3exp} = -\frac{\Re C_1}{C_3}\frac{\Re\left(1+R^2{C_2}^2w^2\right)\left(\left(1+R^2C_2w^2(C_1+C_2)\right)\pm RC_1w\sqrt{1-\Re^2}\right)}{\Re^2(1+(C_1+C_2)^2R^2w^2)\left(1+R^2w^2{C_2}^2\right)-R^2{C_1}^2w^2} \qquad (3.4)$$

بتعويض القيم العددية للتركيب المنجز،وجعل ثابت العزل دالة للتواتر والمردود الطاقوي نجد:

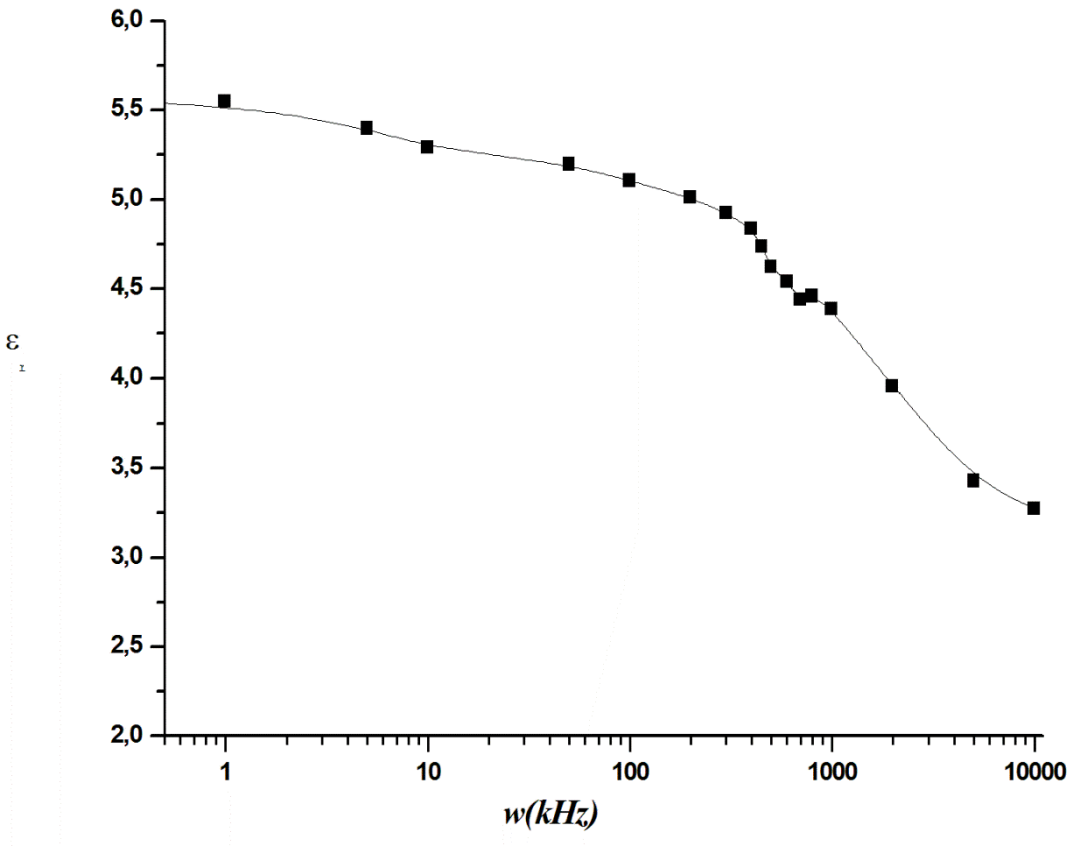
$$\varepsilon_{r3exp} = -7.8\Re\frac{(1+1.05\times10^{-12}w^2)\left(\Re(1+1.29\times10^{-11}w^2)\pm1.15\times10^{-5}w\sqrt{1-\Re^2}\right)}{\Re^2(1+1.58\times10^{-10}w^2)(1+1.05\times10^{-12}w^2)-1.33\times10^{-10}w^2} \qquad (4.4)$$

باستغلال القيم التجريبية للمردود الطاقوي و النسبة المحولة الموضحة في الجدول (2.4)، وتعويضها في العبارتين (2.4) و (4.4)، فإننا سنحصل على القيم التجريبية لثابت العزل عند كل تواتر كما يلي:

الجدول(3.4): حساب القيم التجريبية لثابت العزلε_3 انطلاقا من القيم التجريبية لنسبة الجهد المحولة والمردود الطاقوي بعد استعمال الرمل S_3

$w(kHz)$	η_{exp}	$\varepsilon_{3\eta exp}$	$\Re_{exp}$	$\varepsilon_{3\Re exp}$	ε_{moyen}
1	0.0048	5.550	0.0048	5.550	5.550
5	0.0236	5.397	0.0236	5.397	5.397
10	0.0466	5.293	0.0466	5.293	5.293
50	0.222	5.190	0.222	5.203	5.197
100	0.399	5.117	0.396	5.093	5.105
200	0.605	5.018	0.592	5.001	5.010
300	0.695	4.930	0.664	4.920	4.925
400	0.737	4.837	0.682	4.839	4.838
450	0.748	4.741	0.679	4.732	4.736
500	0.755	4.621	0.672	4.623	4.622
600	0.767	4.525	0.654	4.550	4.538
700	0.774	4.437	0.629	4.440	4.438
800	0.781	4.459	0.604	4.459	4.459
1000	0.780	4.135	0.545	4.643	4.389
2000	0.786	3.940	0.345	3.965	3.953
5000	0.774	3.448	0.148	3.408	3.428
10000	0.764	3.167	0.0711	3.381	3.274

نرسم منحنى تغيرات ثابت العزل بدلالة تواتر الحقول الكهرومغناطيسية الناشئة في الرملS_3، الشكل (2.4).



الشكل(2.4): تغيرات ثابت العزل الكهربائي للرمل S_3 بدلالة تواتر الحقول الكهرومغناطيسية

نلاحظ من خلال المنحنى أن ثابت العزل يكون ثابتًا تقريبا في مجال التواترات المنخفضة و المتوسطة، ثم يتناقص من أجل التواترات المرتفعة $w > 10^3 Hz$. يمكن إيجاد علاقة شبه تجريبية لثابت العزل هذا، عبارتها:

$$\varepsilon_3 = -0.0267 \log^3(w) + 0.206 \log^2(w) - 0.535 \log(w) + 5.958 \qquad (5.4)$$

يفسَّرُ تناقص قيمة ثابت العزل في مجال التواترات الكبيرة بأن زيادة تواتر الحقول الكهربائية يؤدي إلى نقصان مساهمة استقطاب الشحنات الفراغية في الاستقطاب الكلي، كما أن التواترات المرتفعة تقلل من تجاوب ثنائيات الأقطاب الكهربائية المهتزة على مواكبة تغير الحقل المسلط [5].

تجدر الإشارة إلى أنه من غير الممكن استعمال جهاز الفارادمتر لإيجاد قيمة ثابت العزل للرمل عند تواترات مختلفة، ذلك لكوْن الجهاز يعمل في مجال التواترات المنخفضة فقط.

بغض النظر عن تأثير تواتر الحقل الكهرومغناطيسي على ثابت العزل فإن استعمال الرمل كعازل كهربائي قد أثبت نجاعته في زيادة النسبة المحولة من 0.561 إلى 0.823، و كذا زيادة المردود الطاقوي الأعظمي من 0.390 إلى 0.699 كما يظهر ذلك في الشكلين (23.3) و(24.3)

2.2 المرحلة الثانية: إستعمال الرمل S_3 كعازل رملي للمكثفة C'_3، و الرمل S_2 كعازل رملي للمكثفة C'_2:

أ) المقاومية الكهربائية للرمل S_2:

لقد أظهرت النتائج التجريبية الموضحة في العبارة (6.3) من الفصل السابق أن قيمة المقاومية الكهربائية للرمل S_2 أقل قليلا من مقاومية الرمل S_3. أُرجِع هذا من قبلُ إلى كون حبيبات الرمل S_2 أقل تراصًّا من حبيبات الرمل S_3، وبالتالي فالتواصل بين حبيبات الرمل S_3 أكثر منه بين حبيبات الرمل S_2.

إن تقاربَ قيمتَي المقاومية لهذين الرملين ($\rho = 10^{12}\Omega.cm$) جعلنا نرجّح مبدئيا بأن الرملين متماثلان من حيث البنية الكيميائية، و لقد عزّزْنا ذلك بقياس ثابتي العزل لكل منهما؛ إذْ وجِدا متقاربيْن جدا (الجدولين (4.3)و (5.3))، ولقد وجدنا في أطروحة دكتوراه بضياف سميحة[6] ما يدعّم هذا الرأي؛ إذْ كان لهذين الصنفين الحبيبيْن من الرمل نسبة كوارتز نفسها.

ب) ثابت العزل الكهربائي للرمل S_2:

بعد مقارنة مقاوميتي الرملين S_2 و S_3، نتساءل الآن عن مدى اختلاف ثابت العزل الكهربائي بينهما من حيث القيمة أو من حيث كيفية التغير مع زيادة تواتر المولد، لأجل ذلك تمت المعالجة الرياضية للعلاقة (8.2)، لاستخراج عبارةثابت العزل الكهربائي للرمل S_2بدلالة النسبة المحولة فكانت:

$$\varepsilon_{2\eta} = \frac{-C_1C'_3Rw + \sqrt{\left(\frac{C_1C'_3Rw}{\eta}\right)^2 - (C_1 + C'_3)^2}}{RwC_2(C_1 + C'_3)} \qquad (6.4)$$

بتعويض القيم العددية للتركيب المنجز، وجعل ثابت العزل دالة للتواتر والمردود الطاقوي نجد:

$$\varepsilon_{2\eta} = \frac{-1.15\times10^{-5}C'_3w + \sqrt{\left(\frac{1.15\times10^{-5}C'_3w}{\eta}\right)^2 - (2.31\times10^{-9} + C'_3)^2}}{1.06\times10^{-6}\, w(2.31\times10^{-9} + C'_3)} \qquad (7.4)$$

لقد تعذرتْ علينا المعالجة الرياضية للعلاقة (12.2) لاستنباط عبارة مباشرة لثابت العزل الكهربائي للرمل S_2 بدلالة المردود الطاقوي، ذلك أن الحسابات آلت إلى معادلة من الدرجة الرابعة، أحد جذروها هو قيمة ثابت العزل، وهي:

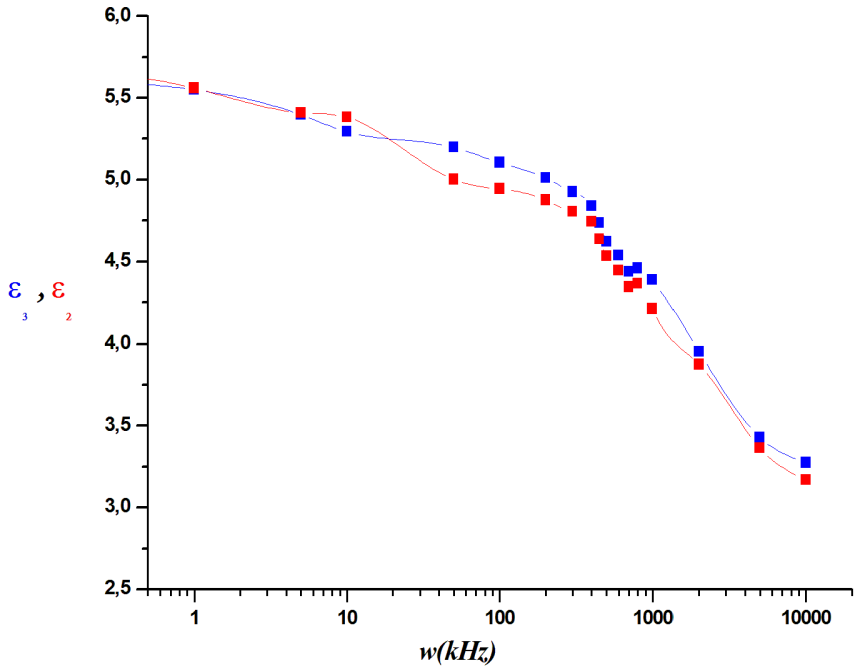
$$\alpha\varepsilon_{2\Re}^{\ 4} + \beta\varepsilon_{2\Re}^{\ 3} + \gamma\varepsilon_{2\Re}^{\ 2} + \delta\varepsilon_{2\Re} + \zeta = 0 \qquad \begin{cases} \alpha = (Rw)^4\left(\Re(C_1 + C'_3)\right)^2 \\ \beta = 2C_1C'_3(Rw)^4\Re^2(C_1 + C'_3) \\ \gamma = (R\,w\,\Re)^2(2(C_1 + C'_3)^2 + (C_1C'_3R\,w)^2) \\ \delta = 2C_1C'_3(C_1 + C'_3)(R\,w\,\Re)^2 \\ \zeta = (C_1 + C'_3)^2\Re^2 + (C_1C'_3R\,w)^2(\Re^2 - 1) \end{cases} \qquad (8.4)$$

بتعويض القيم التجريبية للنسبة المحولة التي استعملت في رسم الشكلين (21.3) و (22.3) مع القيمة التجريبية لسعة المكثفة C'_3 الموضحة في الجدول (4.4)، يمككنا إيجاد قيم ثابت العزل الكهربائي $\varepsilon_{2\eta}$ عند كل تواتر w للمولد:

الجدول(4.4): القيم التجريبية لثابت عزل الرمل S_2 محسوب إنطلاقا من القيم التجريبية لنسبة الجهد المحولةبعد استعمال الرملين S_3 و S_2

$w(kHz)$	$\varepsilon_{r3\eta}$	$C'_3(nF)$	η_{exp}	$\varepsilon_{r2\eta}$
1	5.550	1.643	0.0048	5.560
5	5.397	1.598	0.0236	5.410
10	5.293	1.567	0.0465	5.381
50	5.197	1.538	0.206	5.001
100	5.105	1.511	0.325	4.944
200	5.010	1.483	0.364	4.876
300	4.925	1.458	0.413	4.805
400	4.838	1.432	0.440	4.745
450	4.736	1.402	0.453	4.635
500	4.622	1.368	0.460	4.532
600	4.538	1.343	0.465	4.444
700	4.438	1.314	0.469	4.344
800	4.459	1.320	0.470	4.365
1000	4.389	1.299	0.478	4.210
2000	3.953	1.170	0.484	3.874
5000	3.428	1.015	0.496	3.362
10000	3.274	0.969	0.503	3.167

برسم ثابت العزل الكهربائي للرمل S_2 في المعلم نفسه مع ثابت العزل للرمل S_3، الشكل (6.2)، يتبين أن لهما سلوكًا متماثلا مع تغير التواتر، إذ تتناقص قيمتيهما مع تزايد هذا الأخير،و هو ما فسرناه من قبل بنقصان تجاوب ثنائيات الأقطاب المهتزة مع الترددات الكبيرة للحقل الكهربائي، و كذا اضمحلال مساهمة استقطاب الشحنات الفراغية في الاستقطاب الكلي.



الشكل (3.4): تغيرات ثابتي العزل ε_3 و ε_2 بدلالة تواتر المولد w

من جهة أخرى فإن ثابتي العزل ε_3 و ε_2 متفقان من حيث القيمة، و هو ما يُدعم فكرة تشابه البنية الكيميائية للرملين S_2 و S_3، فقد ورد في المرجع (6) وفي شكله (14.3) أن نسبة الكواتز في كلا الرملين متماثلة وتقدر بـ 65 %، إضافة إلى احتوائهما على تراكيب بلورية مستقطبة موضحة في الجدول (5.4).

الجدول (5.4): ثابت العزل لأغلب مكونات الرمل[18].

المادة	ثابت العزل
الكوارتز	4.19 – 5
الجبس	5 – 11.5
Hematite	25
Anhydrite	5.7 – 6.7
Wollastonite	4.8

الخلاصة العامة

خلاصـــــــــــــة عامة:

في هذه المذكرة تم تصميم محول سعوي باستعمال أنابيب نحاسية، ثم دراسة مميزاته التحويلية من جهد و طاقــة بالاعتماد على قوانين الشبكات و معادلات ماكسويل للكهرومغناطيسية، كما قمنا بالقياس التجريبي لهذه المقادير للتأكد من كفاءة المحول.

لقد استعملنا هذا المحول للتعرف على بعض الخواص الكهربائية، متمثلةً في ثابت العزل الكهربائي و المقاومية الكهربائية لعينة من الكثبان الرملية المتواجدة في منطقة سيدي خويلد بورقلة.

في الفصل الأول قدمنا لمحة عن سلوك العناصر الكهربائية الخاملة في الدارات الكهربائية، ثم عمدنا إلى حساب الطاقة المختزنة أو المتبددة فيها باستعمال نظرية بوينتينغ للطاقة، و بعدها تم التعرف على المحولات المستعملة بكثرة، و هي المحولات الحثية، و مميزاتها التحويلية من جهد و طاقة، مع ذكر جملة من نقائصها، و لقد برّرنا بذلك دراستنا لهذا الموضوع.

خلال الفصل الثاني أُقترح نموذج لمحول سعوي، ثم درسنا نسبة الجهد و المردود الطاقوي الذيْن يحولهما للحمولة، و ذلك باستعمال قوانين الشبكات و قوانين ماكسويل للكهرومغناطيسية، و لقد أظهرت هذه الدراسة تعلق كل من نسبة الجهد المحولة و المردود الطاقوي بمقاومة الحمولة و تواتر المولد.

في الفصل الثالث قمنا بإنجاز عملي لمحول سعوي يتألف من ثلاث مكثفات اسطوانية متمحورة، و أجرينا القياس التجريبي للنسبة المحولة و المردود الطاقوي لهذا المحول باعتبار الهواء عازلا للمكثفات كخطوة أولى (المحول الفراغي)، ثم عينة من الرمل S_2 عازلا للمكثفةC'_2كخطوة ثانية، و أخيرا عينة من الرمل S_3كعازل للمكثفة C'_3، حيث تخللت القياسات حساب مقاومية و ثابت العزل الكهربائي لعينتي الرمل.

أما فصلنا الرابع فقد خصصناه للمقارنة بين النتائج النظرية للنسبة المحولة و المردود الطاقوي مع النتائج التجريبية، حيث وجدناها متطابقة في المحول السّعوي الفراغي، ما يجعله مؤهلا للاستعمال في التكنولوجيا الحديثة، في حين وجدنا اختلافا بين النتائج في المحول السعوي الرملي، إذْ مكننا هذا الاختلاف من اكتشاف أن ثابت العزل الكهربائي للرمل يتعلق بتواتر المولد، و من ثم تعيين تغيراته بدلالة التواتر و إيجاد دالة شبه تجريبية له.

إن دراستنا هذه حول الكفاءة التحويلية للمحول السعوي و توظيفه في الحصول على خاصيتين كهربائيتين لعينات من الرمل، فتح لنا آفاقا واسعة لاستعماله كعنصر تحويل في الدارات الكهربائية، و كذا البحث في البنية الكيمائية لمكونات الرمل استنادا إلى خواص كهربائية مستنبطةٍ من توظيف هذا المحول.

المراجع

المراجع

العربية:

[1] محمود جيلاني، المرجع في محولات القوى الكهربائية ، جامعة القاهرة 2013

[2] شهرة ثورية، محاضرات في الكهرباء و المغناطيسية، جامعة قاصدي مرباح ورقلة ،2015

[3] بن علي حسن، فقد الطاقة الناجم عن توصيل النواقل ببعضها، مذكرة ماستر أكاديمي، ورقلة 2014

[4] مشري محمد العيد، دراسة أثر المعالجة الحرارية على تركيب رمل كثبان ورقلة، وعلى ناقليته، باستخدام الطرق الطيفية، أطروحة دكتوراه، جامعة ورقلة 2016

[5] محمد كامل عبد العزيز و محمد عبد الرحمن الكنهل، الكهرمغناطيسية الهندسية، مركز البحوث في جامعة الملك سعود 2005

[6] بضياف سميحة، تحديد التركيب الجزيئي للأصناف الحبيبية المختلفة لرمل ورقلة وحساب تركيز الكوارتز، أطروحة دكتوراه، جامعة ورقلة 2016.

الأجنبية:

[7] Roxana Breahna, Les Composants Electronique Passifs, Les Circuits, L'universite Laval-Canada 2010

[8] Daniel Dixneuf et Fabien Bellouvet, Principe De Circuite Electrique , Dunod 2007, ISBN 9782100501786

[9] P D Hiscocks, Analog Circuit Desingn, Ceo 2011, ISBN 9780986723506

[10] Hoang Le Huy, Circuite Electrique, Les Presses De L'universite Laval-Canada 2013, ISBN 2763780784

[11] J Lamloumi et Monjia Ben Raiek, Cours De L'electricite, Universite Virtuelle De Tunis 2015

[12] J White And P Overfelt, Poyting's Theorems And Their Relationships To Antenna Power And Bandwidth, Center Weapons Division China 1999

[13]Gabriel Cormier, Cours De Electrotechnique - chapiter 11 : transformateur, Faculte D'ingenierie - Moncton Canada 2016

[14] K. Gosh, Maxwell's Equation and Poynting Theorem, University of Bombay 2006

[15] H. Herman And R. James, Electromagnetic Fields And Energy Englwood Cliffs, Perntice Hall 1989- ISBN 9780132490207

[16] N.Jayachandra, Modeling And Simulation Of Capacitor Voltage Pscad - Article June 2011 Pup:www.Researchgate.Net/Publication /241191215

[17]W.Stalewaski, Novel Capacitor Divider Voltage Sonsor For The High-Voltage Transimmission Systems, PROC IEE, Vol 126, No 11 Novembre 1979

[18] Relative dielectric permittivity of various common minerals, compilation by Sch€on (2004) of data from Dortman (1976), Keller (1989), Olhoeft (1981).

المختصر:

في هذا البحث صُمّمَ محوِّلٌ كهربائيٌ سعويٌ مؤلفٌ من أربعة أنابيب ناقلة متحدة المحور، و دُرسَ نظريًا. أُنجزَ نموذجٌ عمليٌّ للمحول السعوي المدروس نظريًا، وذلك باستخدام أنابيب نحاسية. أُجريَتْ عليه قياسات لنسبة الجهد المحوّلة (η)، وكذا لمردوده الطاقوي $(\mathcal{R})$. أُخذتْ هذه القياسات من خلال ملاحظة تغيرات هذيْن المقداريْن الأخيريْن بدلالة مقاومة الحمولة المتمثلة في ناقل أومي و كذا بدلالة تردد جهد المنبع، كلٍّ على حِدَةٍ. قورنتْ النتائج العملية بالنتائج النظرية المستنبطة من قوانين الشبكات الكهربائية و من قوانين النظرية الكهرومغناطيسية أيضا. لقد كان الاتفاق بينها كبيرا جدا. أُستخدم كذلك رمل الكثبان عازلًا كهربائيًا بين الأنابيب النحاسية، و قيست مقاوميته الكهربائية و ثابت عزله الكهربائي.

الكلمات المفتاحية: محول كهربائي سعّوي، النسبة المحولة للجهد، المردود الطاقوي، رمل الكثبان، المقاومية، ثابت العزل الكهربائي

Abstract:

In this work, an electrical capacitive transformer consisted from four coaxial tubes was designed and was theoretically studied. A practical model of the theoretically designed capacitive transformer was accomplished using copper pipes. Measurements of the ratio of the converted voltage (η) and of its energetic efficiency $(\mathcal{R})$ were made. These measurements were made by observing the changes of (η) and $(\mathcal{R})$ in terms of the load resistance and the source frequency, separately. The experimental results were compared with the theoretical ones derived from the laws of electrical networks and the electromagnetic theory. A good agreement between them was registered. Dune sand was also used as an electrical insulator between the copper tubes. The sand resistivity has been measured, as well as its electrical insulation constant.

Key words: electrical capacitive transformer, the ratio of the converted voltage, energetic efficiency, Dune sand, resistivity, electrical insulation constant.