فهرست مطالب

(۱) مقدمه‌ای بر توموگرافی الکتریکی ۷

مقدمه ۹

جریان الکتریکی ۱۰

انواع جریان الکتریکی ۱۰

جریان متناوب ۱۰

جریان مستقیم ۱۲

امپدانس و رزیستانس ۱۳

شباهت و تفاوت امپدانس و مقاومت ۱۳

توموگرافی امپدانس الکتریکی ۱۴

نظریه توموگرافی امپدانس الکتریکی ۱۵

توموگرافی خازنی الکتریکی ۱۶

توموگرافی الکترومغناطیسی ۱۸

(۲) توموگرافی امپدانس الکتریکی ۱۹

قواعد طراحی ۲۱

کاربردهای توموگرافی امپدانس الکتریکی ۲۲

مزایای توموگرافی امپدانس الکتریکی ۲۴

روش‌های جمع‌آوری داده‌ها ۲۴

اندازه‌گیری الکتریکی امپدانس ۲۵

روش همسایگی ۲۶

روش متقاطع ۲۶

روش مخالف ۲۸

روش تطبیقی ۲۹

تولید و تفسیر تصویر توموگرافی امپدانس الکتریکی ۳۰

ویژگی‌های الکتریکی بافت ۳۱

الکترونیک توموگرافی امپدانس الکتریکی ۳۶

بازسازی تصویر توموگرافی امپدانس الکتریکی ۳۸

(۳) مدل ریاضی ۴۱

مقدمه ۴۳

مدل ریاضی ۴۳

معادله داخل بدن ۴۴

شرایط مرزی ۴۶

مدل پیوسته ۴۷

tnbook.ir

مدل شکاف ۴۸
مدل شانت ۴۸
مدل الکترود کامل ۴۹
(۴) الکترونیک و سخت‌افزار ۵۱
چالش‌ها و رویکردهای سخت‌افزاری ۵۳
سرعت و دقت ۵۴
جریان‌های کاربردی در مقابل ولتاژها ۵۵
سیستم‌های جفت در مقابل درایو موازی ۵۶
اندازه‌گیری ولتاژ در الکترودهای حامل جریان ۵۸
تحریک الکترود ۵۹
منبع جریان ۶۱
منابع جریان متغیر و تک سر ۶۲
منبع جریان موردنیاز ۶۴
شار سرگردان خازن ۶۶
جبران منبع جریان ۶۸
منبع جریان و مدارهای جبران ۶۹
مدارهای کاهش ظرفیت خازنی ۷۴
منابع ولتاژ ۷۶
اتصال به الکترودها ۷۸
کابل‌ها ۷۸
الکترودهای فعال ۸۰
مولتی پلکسرها در مقابل سخت‌افزار موازی ۸۱
اندازه‌گیری ولتاژ ۸۲
فیلتر همسان ۸۳
نویز ۸۴
اندازه‌گیری ولتاژ تفاضلی در مقابل تک ولتاژ ۸۵
بازخورد ولتاژ حالت مشترک ۸۸
سیستم‌های توموگرافی امپدانس الکتریکی ۸۸
نتیجه‌گیری ۹۰
(۵) منابع ۹۱
منابع ۹۳
tnbook.ir

مقدمه

اصطلاح توموگرافی از واژه یونانی *tomos* (برش) و *grapho* (نوشتن) گرفته‌شده است. در ابتدا این اصطلاح برای رادیوگرافی مقطعی به کار می‌رفت که با حرکت هم‌زمان منبع اشعه ایکس و آشکارساز به‌منظور محو کردن داده‌های نامطلوب درحالی‌که تصویر واضحی از صفحه انتخاب‌شده ایجاد می‌شد. توموگرافی الکتریکی (*ET*) یک روش تصویربرداری است که سعی می‌کند خواص الکتریکی مختلف مواد را در حجمی که تنها «اندازه‌گیری‌های مرزی» حاصل از جریان تزریقی را در نظر گرفته، بازسازی کند. این اندازه‌گیری‌ها با استفاده از آرایه‌های دایره‌ای از «حسگرها» الکترودها، الکترودهای نقطه‌ای یا سیم‌پیچ‌ها انجام می‌شود. این یک تکنیک تصویربرداری غیرتهاجمی و مقرون‌به‌صرفه است که بر اساس الگوریتم‌های محاسباتی تکراری[1] است.

1 - *iterative computational*

جریان الکتریکی

در یک مدار الکتریکی، بار الکتریکی را، اغلب، الکترون‌ها حمل می‌کنند. حرکت بارهای الکتریکی تحت عنوان جریان الکتریکی شناخته می‌شود. به معنای دیگر جریان الکتریکی به‌صورت نرخ تغییر بار الکتریکی نسبت به زمان تعریف‌شده که با نماد I نشان داده می‌شود. از این رو با فرض این‌که در بازه زمانی t بار q از مقطعA مفروض بگذرد، جریان الکتریکی برابر با:

$$I = \frac{q}{t} \qquad (۱-۱)$$

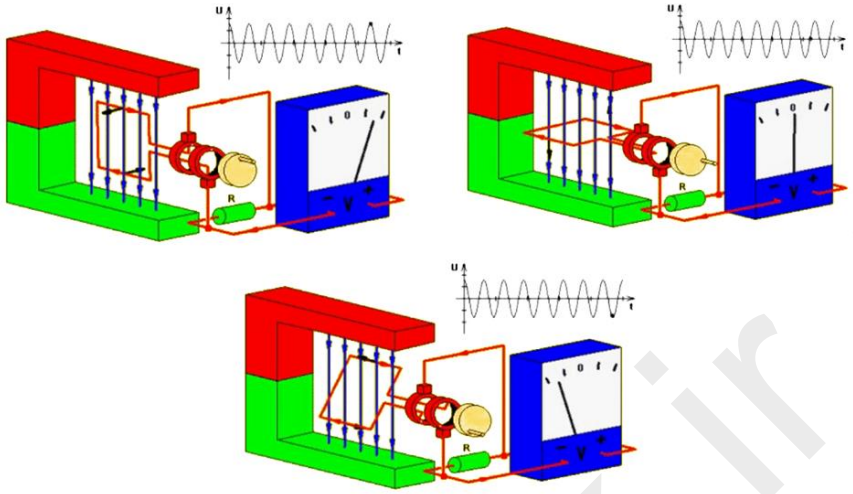
در رابطه بالا q بر حسب کولن و زمان‌بر حسب ثانیه است. در دستگاه بین‌المللی یکاها، واحد جریان الکتریکی نیز به‌افتخار «آندره ماری آمپر» (*André-Marie Ampère*)، آمپر نام‌گذاری شده است. یک آمپر، برابر با گذر یک کولن بار الکتریکی در یک ثانیه از یک سطح است. جریان الکتریکی را با آمپرمتر اندازه می‌گیرند.

انواع جریان الکتریکی

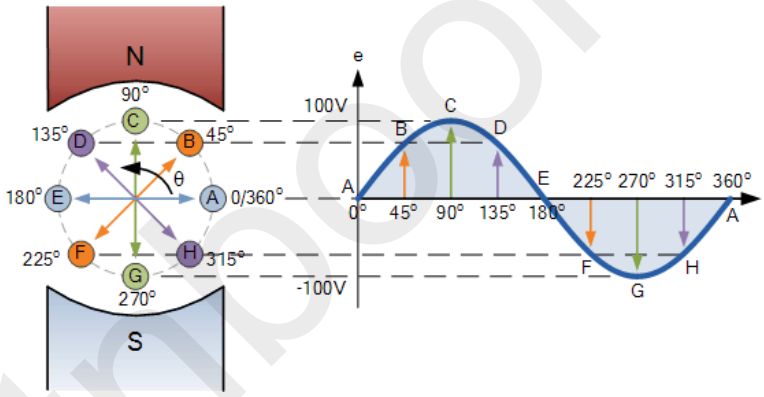
جریان متناوب

جریان متناوب (*Alternating Current* یا *AC*) جریانی است که به طور منظم تغییر جهت می‌دهد. برق تحویل داده شده به شرکت‌ها و منازل، متناوب است. شکل موج جریان متناوب معمولاً به‌صورت یک موج سینوسی است. جریان *AC* توسط دستگاهی بنام مولد جریان متناوب (*Alternator*) تولید می‌شود. این دستگاه یک نوع خاصی از ژنراتور برق است که برای تولید جریان متناوب ساخته شده است. جریان *AC* می‌تواند چندین شکل و حالت داشته باشد، درواقع هر موقع جریان و ولتاژ متناوب باشند آن جریان *AC* است، حال به هر شکلی که باشد.

tbook.ir

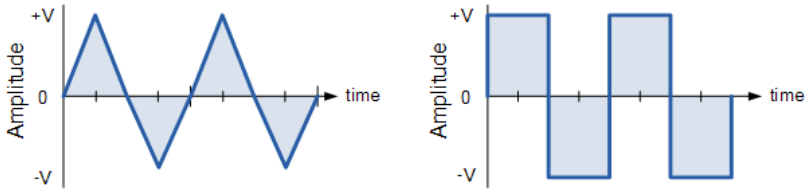


شکل ۱-۱: نحوه عملکرد مولد جریان متناوب (*Alternator*)



شکل ۱-۲: شکل موج سینوسی جریان *AC*

سایر اشکالی که در جریان *AC* زیاد دیده می‌شوند، موج‌های مربعی و مثلثی هستند. امواج مربعی بیشتر در مدارهای دیجیتال و سوئیچی استفاده می‌شوند تا عملکردشان را بررسی کنند. امواج مثلثی بیشتر در مباحث صوتی استفاده می‌شوند و بیشتر برای آزمایش قطعات الکترونیکی خطی نظیر تقویت‌کننده‌ها استفاده می‌شوند.



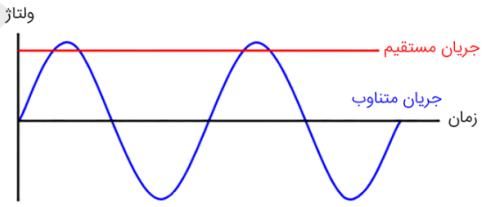
شکل ۱-۳: شکل موج مربعی و مثلثی جریان *AC*

جریان مستقیم

جریان مستقیم (*Direct current* یا (اختصاری *CC* یا *DC*)) ساده‌ترین نوع جریان الکتریکی است که در آن جهت یا علامت جریان باگذشت زمان تغییر نمی‌کند. جریان *DC* یک ولتاژ یا جریان ثابت را تولید می‌کند. به چندین روش می‌توان جریان *DC* تولید کرد:

- یک ژنراتور AC که به دستگاهی بنام کموتاتور (commutator) مجهز شده باشد، می‌تواند جریان مستقیم تولید کند.
- استفاده از یک وسیله بنام «یکسوکننده» (rectifier) که جریان AC را به DC تبدیل می‌کند.
- باتری‌ها جریان DC تولید می‌کنند که این جریان از یک واکنش شیمیایی درون باتری تولید می‌شود.

جریان *DC* جریانی یک‌جهت است، یعنی که جریان آن فقط در یک‌جهت حرکت می‌کند. ولتاژ و جریان آن می‌توانند در زمان متفاوت باشند، ولی جهت آن باید همواره مستقیم باشد و تغییری نکند. این به این معنا که ما می‌توانیم به منابع *DC* اعتماد کنیم که در طول زمان یک ولتاژ ثابت را به ما می‌دهند. البته در واقعیت، به‌عنوان‌مثال یک منبع *DC* مانند یک باتری کم‌کم شارژ خود را از دست می‌دهد، یعنی که با گذر زمان، ولتاژ آن افت می‌کند. ولی برای بیشتر اهداف می‌توانیم ولتاژ را ثابت فرض کنیم.



شکل ۱-۴: مقایسه جریان مستقیم و متناوب

tbook.ir

امپدانس و رزیستانس

در یک مدار جریان متناوب که معمولاً به‌عنوان "مدار AC" شناخته می‌شود؛ امپدانس مخالفت‌کننده با جریان جاری در مدار است. امپدانس، مقداری بر حسب اهم است که اثر ترکیبی عناصر محدودکننده جریان در مدار مانند رزیستانس (R)، اندوکتانس (L) و ظرفیت خازنی (C) است.

در یک مدار مستقیم یا مدار DC، به مخالفت‌کننده با جریان جاری رزیستانس می‌گویند؛ اما در یک مدار AC، امپدانس نتیجه هر دو عناصر مقاومتی (R) و راکتیو (X) مدار است. درحالی‌که مقدار مقاومت الکتریکی موجود در یک مدار DC با حرف "R" نشان داده می‌شود؛ اما برای یک مدار متناوب AC، حرف یا نماد "Z" برای نشان‌دادن مخالفت با جریان جاری استفاده می‌گردد. همچنین، مانند رزیستانس DC، امپدانس برحسب اهم توصیف می‌شود و در صورت لزوم از مضرب‌های اهم استفاده می‌گردد. برای مثال، میکرو اهم ($u\Omega$ یا ۱۰-۶)، میلی اهم ($m\Omega$ یا ۱۰-۳)، کیلو اهم ($k\Omega$ یا ۱۰۳) و مگا اهم ($M\Omega$ یا ۱۰۶) و... و برای هر مورد، امپدانس بر اساس قانون اهم مانند رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$Z = \frac{V}{I} \quad , \quad I = \frac{V}{Z} \quad , V = I \times Z \qquad (۲-۱)$$

در جایی که، Z، امپدانس با یک ای اهم، V با یک ای ولت و I با یک ای آمپر است. امپدانس الکتریکی علاوه بر نماد Z به دو فرم عدد مختلط و یا عدد قطبی مشابه زیر مقداردهی و نمایش می‌دهند:

فرم عدد مختلط $Z = R + jx$

فرم عدد قطبی $Z = |Z|e^{j\ arg\,(Z)}$

شباهت و تفاوت امپدانس و مقاومت

ابتدا، ما شباهت‌های این دو را بررسی می‌کنیم. امپدانس هم درست مانند مقاومت، مقداری است که میزان مقاومتی را که یک قطعه در برابر جریان الکتریکی دارد نشان می‌دهد و درست مانند مقاومت، واحد اندازه‌گیری آن، اهم (Ω) است.

tnbook.ir

در بررسی تفاوت میان مقاومت و امپدانس، باید بگوییم که *Impedance* از این نظر متفاوت است که مقدار مقاومتی که یک قطعه در برابر سیگنال دارد با فرکانس سیگنال متفاوت است. این بدان معناست که مقاومت قطعه بسته به فرکانس سیگنال ورودی به قطعه متفاوت است. مقاومت یک مقدار و اندازه‌گیری مستقل از فرکانس است. فرکانس سیگنال عبوری از آن را در نظر نمی‌گیرد، زیرا فرکانس بر مقاومت قطعات غیر واکنشی تأثیر نمی‌گذارد. قطعات مقدار مقاومتی را که در مدار ارائه می‌دهند بسته به فرکانس سیگنال ورودی تغییر می‌دهند؛ اما امپدانس باتوجه‌به فرکانس سیگنال ورودی به آن متفاوت است.

سه نوع اصلی توموگرافی الکتریکی (*ET*) وجود دارد:

- توموگرافی امپدانس الکتریکی (EIT)
- توموگرافی خازنی الکتریکی (ECT)
- توموگرافی الکترومغناطیسی (EMT)

در بخش‌های بعدی به طور مختصر به هر نوع، کاربردهای آن و روش‌های اندازه‌گیری می‌پردازیم.

توموگرافی امپدانس الکتریکی

توموگرافی امپدانس الکتریکی، *EIT* یک روش برای ایجاد تصاویر توموگرافی از خواص الکتریکی بافت درون بدن بر پایه اندازه‌گیری امپدانس الکتریکی در الکترودهای سطح بدن است. اصطلاح توموگرافی به تصویربرداری از حجم درون بدن با استفاده از انرژی نافذ از خارج از بدن اشاره دارد. روش‌های توموگرافی معمولاً بر اساس انرژی مورداستفاده یا تعامل آن با بدن نام‌گذاری می‌شوند؛ بنابراین *EIT* به این دلیل نام‌گذاری شده است که از اندازه‌گیری امپدانس الکتریکی استفاده می‌کند. *EIT* به‌عنوان یک ابزار علمی پذیرفته‌شده است، پیشرفت‌های فنی اکنون بر محاسبه پارامترهای قوی و مفید بالینی نیز تمرکز دارند.

در مقایسه با تکنیک‌هایی مانند توموگرافی کامپیوتری اشعه ایکس و توموگرافی گسیل پوزیترون، *EIT* حدود هزار برابر ارزان‌تر، هزار بار کوچک‌تر است و نیازی به تشعشعات یونیزان ندارد. علاوه بر این، *EIT* در اصل می‌تواند هزاران تصویر در ثانیه تولید کند. محدودیت‌های اصلی آن وضوح فضایی پایین آن است. ثبت و ضبط‌ها معمولاً با اعمال جریان به بدن یا سیستم تحت آزمایش با استفاده از مجموعه‌ای از الکترودها