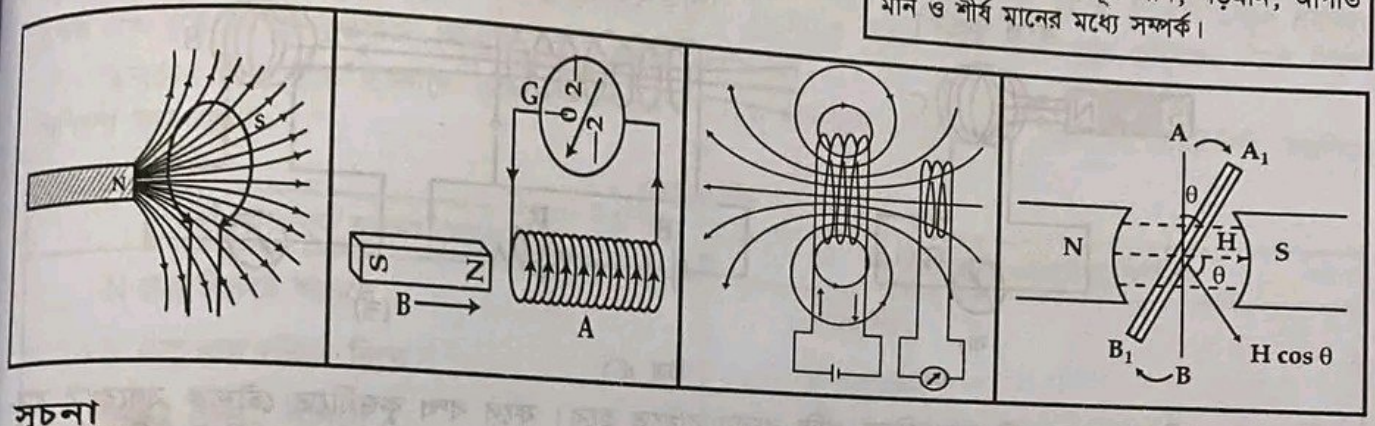
৫

তড়িৎ চৌম্বক আবেশ ও পরিবর্তী প্রবাহ
ELECTROMAGNETIC INDUCTION AND ALTERNATING CURRENT

প্রধান শব্দ (Key Words) : তড়িৎ চুম্বকীয় আবেশ, আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তি, আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহ, মুখ্য ও গৌণ কুণ্ডলী, ফ্যারাডের তড়িৎ-চুম্বকীয় আবেশ সূত্রাবলি, লেন্‌জ-এর সূত্র, স্বকীয় আবেশ, পারস্পরিক আবেশ, স্বকীয় আবেশ বা স্বাবেশ গুণাঙ্ক, পারস্পরিক আবেশ গুণাঙ্ক, স্বকীয় ও পারস্পরিক আবেশ গুণাঙ্কের একক, একমুখী প্রবাহ, পরিবর্তী প্রবাহ, দিক পরিবর্তী প্রবাহ সৃষ্টি, প্রবাহের গড়মান, শীর্ষ মান, শক্তির গড় বর্গের বর্গমূল মান, গড়মান, আপাত মান ও শীর্ষ মানের মধ্যে সম্পর্ক।



সূচনা
Introduction

পূর্বের অধ্যায়ে আমরা জেনেছি যে, একটি তড়িৎবাহী তারকে একটি চৌম্বক ক্ষেত্রে রাখলে তারটিতে গতির সঞ্চার হতে পারে। 1831 সালে বিখ্যাত বিজ্ঞানী **মাইকেল ফ্যারাডে** সর্ব প্রথম এর বিপরীত ঘটনা লক্ষ করেন। তিনি পরীক্ষার মাধ্যমে দেখান যে একটি বন্ধ পরিবাহী তারকে চৌম্বক ক্ষেত্রে গতিশীল করা হলে পরিবাহী তারটির মধ্যে তড়িৎ প্রবাহ সৃষ্টি হয়। ফ্যারাডের পরীক্ষা প্রমাণ করে যে, গতিশীল চুম্বক তড়িৎ প্রবাহ সৃষ্টি করতে পারে। সাধারণভাবে এই ঘটনাই তড়িচ্চুম্বকীয় আবেশ। অতএব, তড়িৎ প্রবাহ ও চুম্বকত্ব বিচ্ছিন্ন ঘটনা নয়। একটির সাথে অন্যটি ওতপ্রোতভাবে জড়িত।

চৌম্বক ক্ষেত্র ও পরিবাহীর মধ্যে আপেক্ষিক গতির জন্য তড়িৎ শক্তি উৎপন্ন হওয়ার ঘটনাকে তড়িৎ চৌম্বকীয় আবেশ বলা হয়। এই আবিষ্কারকে ভিত্তি করে **জেনারেটর** (Generator), **ট্রান্সফরমার** (Transformer) ও অন্যান্য বৈদ্যুতিক যন্ত্রপাতি আবিষ্কৃত হয়েছে।

এ অধ্যায় পাঠ শেষে শিক্ষার্থীরা—

- তড়িৎ চৌম্বকীয় আবেশ ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- চুম্বকের সাহায্যে তড়িৎ শক্তি উৎপাদন বর্ণনা করতে পারবে।
- আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল সৃষ্টি ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- ফ্যারাডের তড়িৎ চৌম্বকীয় আবেশের সূত্র ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- লেনজ-এর সূত্র ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- লেনজ-এর সূত্রের সাথে শক্তির নিত্যতার সূত্রের সম্পর্ক ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- স্বকীয় আবেশ ও পারস্পরিক আবেশ ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- দিক পরিবর্তী প্রবাহ সৃষ্টির কৌশল ব্যাখ্যা করতে পারবে।
- বর্গমূলীয় গড়মান, শীর্ষমান এবং প্রবাহ ব্যাখ্যা করতে পারবে।

নিম্নে তড়িৎ চৌম্বকীয় আবেশ এবং এতদসংশ্লিষ্ট বিভিন্ন বিষয়াদি আলোচনা করা হলো।

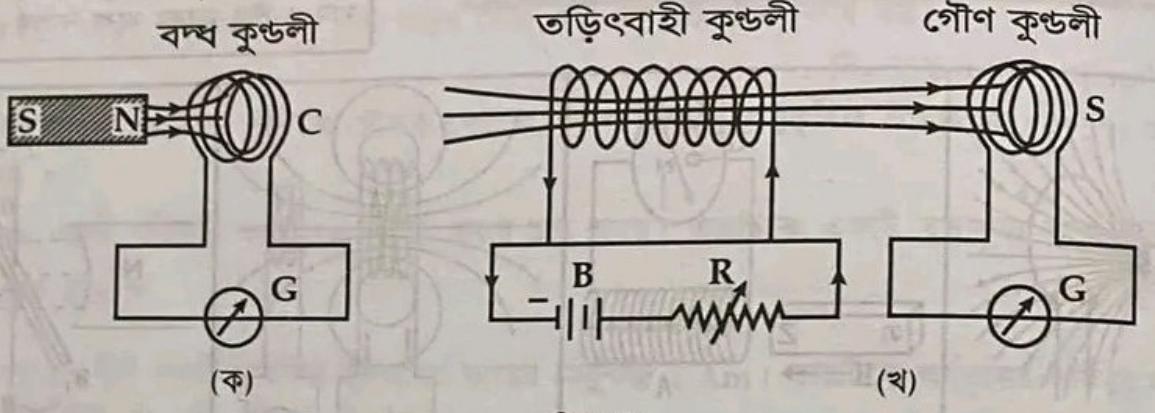
৫.১ তড়িৎ চৌম্বকীয় আবেশ
Electromagnetic induction

একটি চুম্বককে বাম হাতে ধরে রাখ, ডান হাতে একটি বন্ধ কুণ্ডলীকে চুম্বকের দিকে দ্রুত সরাও অথবা ডান হাতে বন্ধ কুণ্ডলীটিকে স্থির রেখে বাম হাতে রাখা চুম্বকটিকে কুণ্ডলীর দিকে সরিয়ে আন। আবার চুম্বক ও কুণ্ডলীকে একসাথে পরস্পরের কাছে আন এবং দূরে সরাও। উভয় ক্ষেত্রে কী ঘটবে বলতে পার ? দেখা যাবে যে, বন্ধ কুণ্ডলীটিতে

তড়িচ্চালক শক্তি বা তড়িৎ প্রবাহ উৎপন্ন হবে। অর্থাৎ চৌম্বক ক্ষেত্রের সাহায্যে বন্ধ বর্তনী বা কুণ্ডলীতে তড়িচ্চালক শক্তি বা তড়িৎ প্রবাহ উৎপন্ন করা যায়। একটি বন্ধ কুণ্ডলী বা বর্তনী এবং একটি চুম্বকের গতির ফলে এরূপ ঘটে। গতিশীল চুম্বক বা তড়িৎ বর্তনী দ্বারা কোনো বন্ধ বর্তনীতে তড়িচ্চালক শক্তি উৎপন্ন হওয়ার ঘটনাকে তড়িৎ চৌম্বকীয় আবেশ বলে।

অর্থাৎ একটি গতিশীল চুম্বক কিংবা তড়িৎবাহী কুণ্ডলীর প্রভাবে একটি বন্ধ তার কুণ্ডলীতে ক্ষণস্থায়ী তড়িচ্চালক শক্তি তথা তড়িৎ প্রবাহ উৎপন্ন হওয়ার পদ্ধতিকে তড়িৎ চৌম্বকীয় আবেশ বলে।

বন্ধ তার কুণ্ডলীতে [চিত্র ৫·১ (ক)-এ C] বা গৌণ কুণ্ডলীতে [চিত্র ৫·১ (খ)-এ S] একটি গ্যালভানোমিটার স্থাপন করলে তড়িৎ প্রবাহের অস্তিত্ব বুঝা যাবে। যদি তড়িৎবাহী কুণ্ডলী কিংবা চুম্বক NS স্থির থাকে তবে বন্ধ কুণ্ডলী C বা S-এ কোনো তড়িৎ প্রবাহ সৃষ্টি হবে না। বন্ধ কুণ্ডলীতে তড়িৎ প্রবাহ সৃষ্টি করতে হলে চুম্বক কিংবা তড়িৎবাহী কুণ্ডলী



চিত্র ৫·১

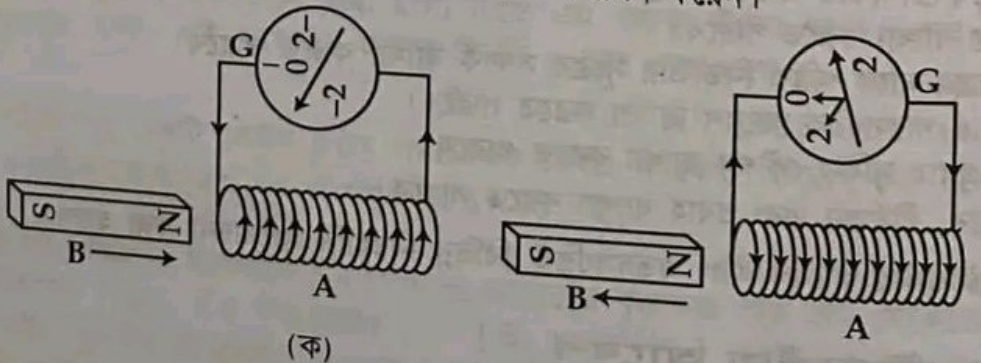
এবং বন্ধ কুণ্ডলীর মধ্যে একটি আপেক্ষিক গতি বজায় রাখতে হবে। ফলে বন্ধ কুণ্ডলীতে চৌম্বক বলরেখার হ্রাস-বৃদ্ধি ঘটবে এবং তড়িৎ প্রবাহ সৃষ্টি হবে। এভাবে সৃষ্ট ক্ষণস্থায়ী তড়িচ্চালক শক্তিকে **আবিষ্ট তড়িচ্চালক** শক্তি (Induced electromotive force) এবং ক্ষণস্থায়ী তড়িৎ প্রবাহকে **আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহ** (Induced current) বলে। কাজেই **কোনো বন্ধ বর্তনীতে তড়িৎ-চৌম্বক আবেশে সৃষ্ট ক্ষণস্থায়ী তড়িচ্চালক শক্তিকে আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তি এবং প্রবাহকে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহ বলে।** তড়িৎবাহী কুণ্ডলীকে **মুখ্য কুণ্ডলী** (Primary coil) বলে। যে তারের কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহ উৎপন্ন হয়, তাকে **গৌণ কুণ্ডলী** (Secondary coil) বলে। মনে রাখতে হবে যে, এ ক্ষেত্রে গৌণ কুণ্ডলীর সাথে চুম্বকের বা মুখ্য কুণ্ডলীর কোনো সরাসরি সংযোগ থাকে না।

উল্লেখ্য, তড়িৎবাহী কুণ্ডলীতে তড়িৎ প্রবাহ মাত্রা অসম হলে বন্ধ কুণ্ডলী ও তড়িৎবাহী কুণ্ডলীর মধ্যে আপেক্ষিক গতি না থাকলেও বন্ধ কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তি দেখা দিবে।

জানার বিষয় : (I) বিদ্যুৎ প্রবাহের চৌম্বক ক্রিয়া আবিষ্কার করেন ওয়েরস্টেড।
(II) তড়িৎ চৌম্বকীয় আবেশ আবিষ্কার করেন ফ্যারাডে।

৫·২ চুম্বকের সাহায্যে তড়িৎশক্তি উৎপাদন
Production of electricity by a magnet

আমরা আগেই জেনেছি চুম্বক এবং কুণ্ডলীর পারস্পরিক গতির ফলে তড়িৎশক্তি উৎপন্ন হয়। বিজ্ঞানী ফ্যারাডে অবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহ উৎপাদন নিম্নের পরীক্ষার সাহায্যে সর্বপ্রথম উপস্থাপন করেন।



চিত্র ৫·২

মনে কর NS একটি দণ্ড চুম্বক, A একটি বহুপাকবিশিষ্ট বন্ধ তার কুণ্ডলী যার সাথে গ্যালভানোমিটার G যুক্ত আছে [চিত্র ৫·২]। গ্যালভানোমিটারের কাঁটার বিক্ষেপ দেখে কুণ্ডলীতে তড়িৎ প্রবাহের অস্তিত্ব বুঝা যায়। সূক্ষ্ম অন্তরীত

তার দিয়ে কুণ্ডলী তৈরি। এবার চুম্বকের উত্তর মেরুকে ধীরে ধীরে কুণ্ডলীর প্রান্তের দিকে নিয়ে গেলে দেখা যাবে যে, গ্যালভানোমিটারের কাঁটা বিক্ষিপ্ত হচ্ছে [চিত্র ৫·২ (ক)]। সুতরাং বন্ধ কুণ্ডলীতে তড়িৎ প্রবাহের অস্তিত্ব প্রমাণ করা যায়। ওই একই মেরুকে কুণ্ডলী থেকে দূরে সরিয়ে নিয়ে গেলেও গ্যালভানোমিটারের কাঁটা বিপরীত দিকে বিক্ষিপ্ত হয় [চিত্র ৫·২(খ)]।

চুম্বককে থামালে গ্যালভানোমিটারের কাঁটা 0-তে স্থিরাবস্থায় ফিরে আসবে। সুতরাং প্রমাণিত হয় যে, **যতক্ষণ চুম্বক এবং কুণ্ডলীর মধ্যে আপেক্ষিক গতি থাকে ততক্ষণই আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহ চলে এবং তড়িৎ শক্তির উৎপাদন হয়।**

চুম্বককে দ্রুত বন্ধ কুণ্ডলী হতে দূরে আনলে কিংবা দ্রুত কুণ্ডলীর দিকে আনলে তড়িৎ প্রবাহ তীব্র হয়। **আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহের মাত্রা চুম্বক এবং কুণ্ডলীর আপেক্ষিক বেগের ওপর নির্ভর করে।**

চুম্বকের উত্তর মেরুর পরিবর্তে দক্ষিণ মেরু দ্বারা উপরোক্ত পদ্ধতিসমূহ পুনরাবৃত্তি করলে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহের অভিমুখ প্রত্যেক ক্ষেত্রে উল্টে যাবে। চুম্বককে স্থির রেখে কুণ্ডলীকে ধীরে ধীরে কিংবা দ্রুত চুম্বকের দিকে কিংবা চুম্বক হতে দূরে সরালে কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহ উৎপন্ন হয়।

চুম্বকের দিক হতে তাকালে কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িৎ অভিমুখে যেরূপ দেখা যাবে তা নিম্নলিখিত সারণিতে লিপিবদ্ধ করা হলো।

সারণি ১

কুণ্ডলী সাপেক্ষে চুম্বক মেরুর গতি	আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহের অভিমুখ
N-মেরু নিকটে আনলে	বামাবর্তী
N-মেরু দূরে সরিয়ে নিলে	দক্ষিণাবর্তী
S-মেরু নিকটে আনলে	দক্ষিণাবর্তী
S-মেরু দূরে সরিয়ে নিলে	বামাবর্তী

কাজ : ওপরের পরীক্ষা থেকে উপলব্ধি করে বল কী কী বিষয়ের পরিবর্তনে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহের মাত্রা বৃদ্ধি পায়?

(i) কুণ্ডলীর ক্ষেত্রফল এবং পাক সংখ্যা বৃদ্ধি পেলে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহের মাত্রা বৃদ্ধি পায়।
(ii) ব্যবহৃত চুম্বকের মেরুশক্তি বাড়লে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহের মাত্রা বৃদ্ধি পায়।
(iii) চুম্বক ও কুণ্ডলীর আপেক্ষিক গতি বৃদ্ধি করলে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহের মাত্রা বৃদ্ধি পায়।
(iv) কুণ্ডলীর অভ্যন্তরে কাঁচা লোহার মজ্জা থাকলে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহের মাত্রা বৃদ্ধি পায়।

হাতে কলমে করে দেখ : একটি ধাতব তারের কুণ্ডলী একটি অসম চৌম্বক ক্ষেত্রে স্থির অবস্থায় আছে। কুণ্ডলীতে কোনো তড়িচ্চালক বল আবিষ্ট হবে কি?

কুণ্ডলীতে তড়িচ্চালক বল আবিষ্ট হবে। তড়িৎ চুম্বকীয় আবেশের নিয়ম অনুযায়ী কোনো বন্ধ কুণ্ডলীর সাথে সংশ্লিষ্ট চৌম্বক বলরেখার পরিবর্তন হলে কুণ্ডলীতে তড়িচ্চালক বলের সৃষ্টি হয়। চৌম্বক ক্ষেত্র অসম হওয়ায়, ক্ষেত্রের চৌম্বক বলরেখার পরিবর্তন করে। এরূপ পরিবর্তিত চৌম্বক প্রবাহে তার কুণ্ডলী স্থির অবস্থায় থাকায় কুণ্ডলীতে তড়িচ্চালক বল আবিষ্ট হবে।

৫·৩ আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল

Induced electromotive force

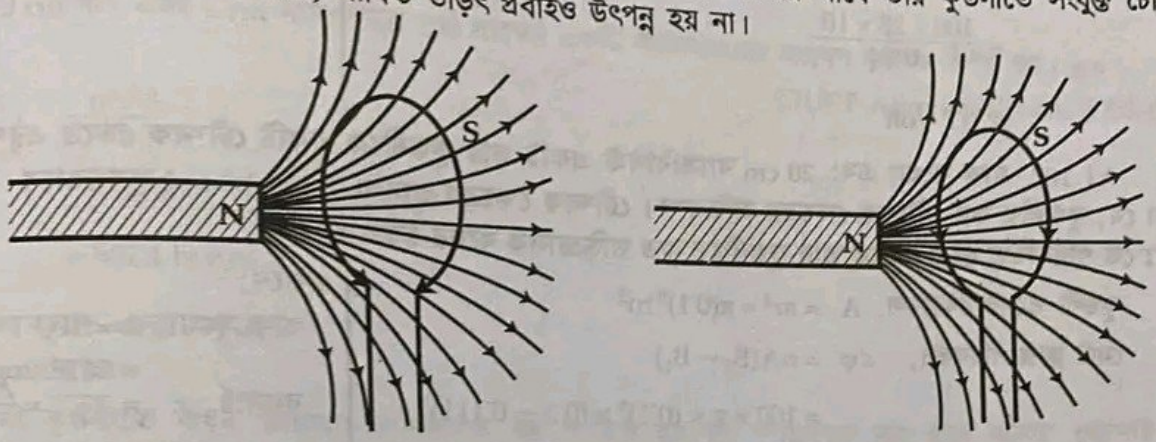
চৌম্বক ক্ষেত্রে কীভাবে একটি বন্ধ কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহ উৎপন্ন হয় তা আমারা জেনেছি। কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহের উপস্থিতিই প্রমাণ করে যে, এতে একটি তড়িচ্চালক বল আবিষ্ট হয়েছে। কুণ্ডলীটি বন্ধ না হয়ে এর প্রান্তদ্বয়ের মধ্যে কিছুটা ফাঁক অর্থাৎ ছোট বায়ুছেদ (air gap) থাকলেও আবিষ্ট তড়িচ্চালক বলের অস্তিত্ব বজায় থাকে। কিন্তু উহা তড়িৎ প্রবাহ চালনা করতে পারে না। এখন আমরা দেখব আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল এবং আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহ বলতে আমরা কী বুঝি ?

তড়িৎ চৌম্বকীয় আবেশের ফলে সৃষ্ট ক্ষণস্থায়ী তড়িচ্চালক বলকে আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল (Induced electromotive force) এবং ক্ষণস্থায়ী তড়িৎ প্রবাহকে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহ (Induced current) বলে। কোনো বন্ধ বর্তনীতে তড়িৎ চৌম্বকীয় আবেশে সৃষ্ট ক্ষণস্থায়ী তড়িচ্চালক বলকে আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল এবং প্রবাহকে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহ বলে।

1831 খ্রিস্টাব্দে বিখ্যাত বিজ্ঞানী ফ্যারাডে তড়িৎ চৌম্বকীয় আবেশের দুটি সূত্র আবিষ্কার করেন। তাঁর নামানুসারে এদেরকে তড়িৎ চুম্বকীয় আবেশের ক্ষেত্রে ফ্যারাডের সূত্র বলে। সূত্রগুলো নিম্নে বিবৃত হলো—

প্রথম সূত্র : যখনই কোনো বদ্ধ তার কুণ্ডলীতে আবদ্ধ চৌম্বক বলরেখার সংখ্যা বা চৌম্বক ফ্লাক্স-এর পরিবর্তন ঘটে তখনই উক্ত কুণ্ডলীতে একটি তড়িচ্চালক শক্তি আবিষ্ট হয়।

ব্যাখ্যা : একটি দণ্ড চুম্বক বা একটি তড়িৎবাহী তার কুণ্ডলী [চিত্র ৫.৫ (ক) ও ৫.৫(খ)] এবং একটি বদ্ধ গৌণ তার কুণ্ডলীর মধ্যে আপেক্ষিক গতি থাকলে অথবা একটি গৌণ কুণ্ডলীর মধ্যে একটি তড়িৎবাহী তার কুণ্ডলী রেখে তড়িৎ প্রবাহমাত্রার পরিবর্তন করলে গৌণ কুণ্ডলীর সাথে জড়িত চৌম্বক ক্ষেত্ররেখার সংখ্যার পরিবর্তন ঘটে এবং এর ফলে গৌণ কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তি বা তড়িৎ প্রবাহের সৃষ্টি হয়। সময়ের সাথে তার কুণ্ডলীতে সংযুক্ত চৌম্বক ক্ষেত্ররেখার সংখ্যার পরিবর্তন না হলে, আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহও উৎপন্ন হয় না।



(ক) কোনো এক সময় কুণ্ডলীতে আবদ্ধ ফ্লাক্স = φ_1

(খ) t সময় পরে কুণ্ডলীতে আবদ্ধ ফ্লাক্স = φ_2

চিত্র ৫.৫

দ্বিতীয় সূত্র : তার কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তির মান সময়ের সাথে কুণ্ডলী দিয়ে অতিক্রান্ত চৌম্বক ক্ষেত্ররেখার সংখ্যা বা চৌম্বক ফ্লাক্স-এর পরিবর্তনের হারের সমানুপাতিক।

ব্যাখ্যা : মনে করি কোনো মুহূর্তে কুণ্ডলীতে আবদ্ধ চৌম্বক ক্ষেত্ররেখার সংখ্যা বা চৌম্বক ফ্লাক্স-এর পরিমাণ = φ_1। ধরি t সময় পর ওই কুণ্ডলীতে আবদ্ধ চৌম্বক ফ্লাক্স-এর পরিমাণ = φ_2 [চিত্র ৫.৫]।

যদি E আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তি হয়, তবে দ্বিতীয় সূত্র হতে পাই,

$$E \propto \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{t} \quad \ldots \quad (5.1)$$

যদি $\varphi_2 - \varphi_1 = \varphi$ হয়, তবে $E \propto \frac{\varphi}{t}$

$$\text{বা, } E = K\frac{\varphi}{t} \quad \ldots \quad (5.2)$$

এখানে K একটি সমানুপাতিক ধ্রুবক যার মান পরিমাপের এককের ওপর নির্ভর করে। যদি φ ওয়েবারে, সময় t সেকেন্ডে এবং আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তি E ভোল্টে অর্থাৎ প্রাকৃতিক রাশিগুলো এস. আই. এককে প্রকাশ করা হয়, তবে

$$K = 1 \quad \ldots \quad (5.3)$$

$\therefore$ সমীকরণ (5.2) হতে পাই, $E = \frac{\varphi}{t}$ ... যদি dt সময়ে ফ্লাক্স-এর পরিবর্তন $d\varphi$ হয়, তবে ক্যালকুলাসের সাহায্যে এই সূত্রকে প্রকাশ করা যায়।

$$E = \frac{d\varphi}{dt} \quad \ldots \quad (5.4)$$

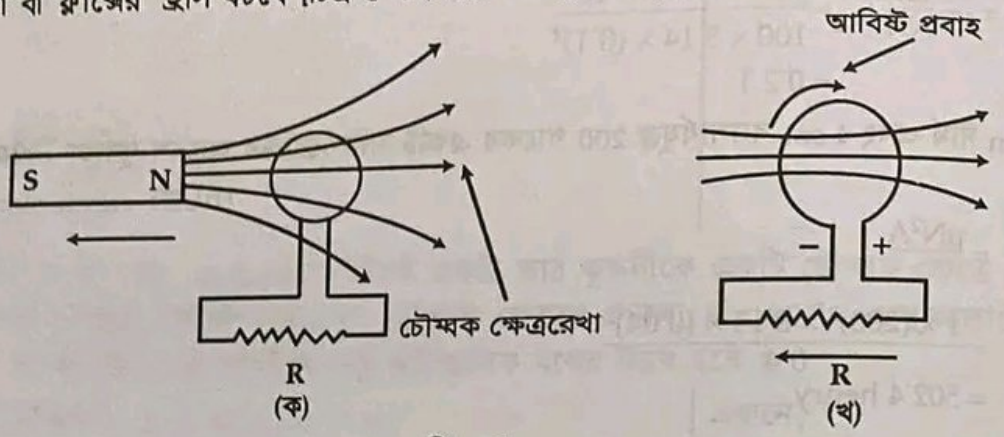
যদি কুণ্ডলীতে N সংখ্যক পাক থাকে, তবে

$$E = \frac{d}{dt}(N\varphi) = N\frac{d\varphi}{dt} \quad \ldots \quad (5.5)$$

ফ্যারাডের দ্বিতীয় সূত্রের গাণিতিক রূপ দেন নিউম্যান। তাই এটি নিউম্যান-এর সূত্র (Newmann's law) নামেও পরিচিত।

হবে। চিত্রে যেহেতু দণ্ড চুম্বকের ক্ষেত্ররেখা বাম থেকে ডানে কুণ্ডলীর ভেতর দিয়ে অতিক্রম করছে; সুতরাং আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহের জন্য সৃষ্ট চৌম্বক ক্ষেত্ররেখা কুণ্ডলীর ভেতর দিয়ে ডান থেকে বামে অতিক্রম করবে [চিত্র ৫·৬ (খ)]। এ ধরনের আবিষ্ট ক্ষেত্র সৃষ্টির জন্য কুণ্ডলীতে আবিষ্ট প্রবাহের অভিমুখ (ডান হস্ত নিয়ম অনুসারে) অবশ্যই বামাবর্ত (counter clockwise) হতে হবে। কুণ্ডলীটি একটি ব্যাটারির ন্যায় তড়িচ্চালক শক্তির উৎস হিসেবে কাজ করবে। তড়িচ্চালক শক্তির ধনাত্মক ও ঋণাত্মক প্রান্ত চিত্রের অনুরূপ হবে।

চুম্বক দণ্ডটি কুণ্ডলী থেকে দূরে সরিয়ে নেয়া হলে বিপরীত ঘটনা ঘটবে। অর্থাৎ কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত চৌম্বক ক্ষেত্ররেখা বা ফ্লাক্সের হ্রাস ঘটবে [চিত্র ৫·৭ (ক)]। লেন্‌জের সূত্র অনুসারে কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহের



চিত্র ৫·৭

জন্য সৃষ্ট চৌম্বক ক্ষেত্রের অভিমুখ এমন হবে যেন ফ্লাক্সের হ্রাসকে বাধা দেয়। আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহের অভিমুখ এক্ষেত্রে দক্ষিণাবর্তী (clockwise) হবে [চিত্র ৫·৭ (খ)]।

অতএব, ফ্যারাডে ও লেনজ্-এর সূত্রের সমন্বয় করে আমরা পাই,

$$E = -\varphi/t \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (5.6)$$

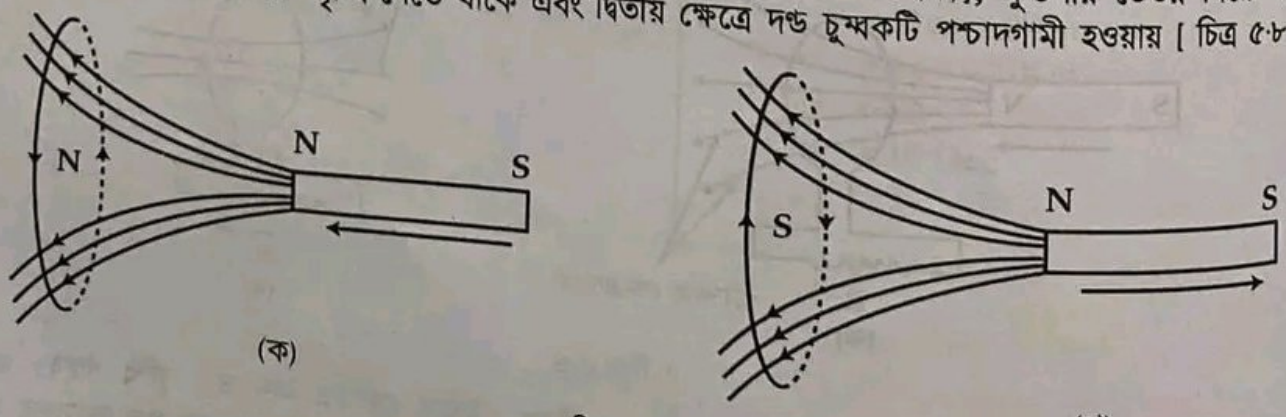
বা, $$E = -\frac{d\varphi}{dt} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (5.7)$$

এখানে ঋণাত্মক চিহ্ন E এবং φ/t বা $\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)$ পরস্পরের বিপরীত অভিমুখে ক্রিয়া করে বুঝায়।

৫·৬ লেন্‌জ-এর সূত্র ও শক্তির নিত্যতা সূত্র
Lenz's law and principle of conservation of energy

মনে করি একটি দণ্ড চুম্বক NS-এর উত্তর মেরু N-কে একটি তার কুণ্ডলীর দিকে আনা হচ্ছে। ফলে ওই মেরুর সম্মুখের কুণ্ডলীর তলটি সমমেরুর ন্যায় আচরণ করে অর্থাৎ বিকর্ষণ বল দ্বারা ওই আবেশী মেরুর অগ্রসরে বাধা দেয়। আবার আবেশী মেরুকে দূরে সরালে আবিষ্ট প্রবাহ বিপরীত দিকে চলে, ফলে কুণ্ডলীর নিকট তল বিপরীত মেরুর ন্যায় আচরণ করে অর্থাৎ আবেশী মেরুর ওপর আকর্ষণ দ্বারা চৌম্বক ফ্লাক্স-এর হ্রাসের বিরোধিতা করে।

প্রথম ক্ষেত্রে দণ্ড চুম্বকটি কুণ্ডলীর দিকে অগ্রসরমান হওয়ায় [চিত্র ৫·৮ (ক)], কুণ্ডলীর ভেতর দিয়ে অতিক্রান্ত ফ্লাক্সের বা ক্ষেত্ররেখার সংখ্যা বৃদ্ধি পেতে থাকে এবং দ্বিতীয় ক্ষেত্রে দণ্ড চুম্বকটি পশ্চাদগামী হওয়ায় [চিত্র ৫·৮ (খ)]



চিত্র ৫·৮

কুণ্ডলী থেকে দূরে সরে যায়, ফলে কুণ্ডলীর ভেতর দিয়ে অতিক্রান্ত আবেশ রেখা বা ক্ষেত্র রেখার সংখ্যা কমতে থাকে। উভয় ক্ষেত্রেই কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহের দিক এমন হয় যে কুণ্ডলীর অগ্রগমন এবং প্রত্যাগমনকে বাধা প্রদান

... কুণ্ডলীতে তড়িৎ প্রবাহ সৃষ্টি হবে। ... ঘটনা ঘটবে। অর্থাৎ দণ্ড চুম্বক বা

আমরা জানি, কোনো কুণ্ডলী বা বর্তনীতে তড়িৎ প্রবাহ চালনা করার জন্য তড়িৎ শক্তির উৎস (যেমন তড়িৎ কোষ) প্রয়োজন। অথচ এক্ষেত্রে কুণ্ডলীর সঙ্গে কোনো তড়িৎ উৎসের সংযোগ নাই; তথাপি কুণ্ডলীতে তড়িৎ প্রবাহের সৃষ্টি হয়েছে। এ থেকে আপাত মনে হওয়া স্বাভাবিক যে কোনো শক্তি ব্যয় না করেই কুণ্ডলীতে তড়িৎ শক্তি সৃষ্টি হয়েছে। এটি শক্তির নিত্যতা সূত্রের সম্পূর্ণ পরিপন্থী। কিন্তু শক্তির নিত্যতা সূত্র অনুসারে শক্তির সৃষ্টি বা বিনাশ হয় না। শুধু রূপান্তর হয় মাত্র। একটু লক্ষ করলেই বোঝা যাবে যে এটি শক্তির নিত্যতা সূত্রের পরিপন্থী নয়। কেননা দণ্ড চুম্বকটি যখন কুণ্ডলীর দিকে অগ্রসর হয় তখন কুণ্ডলীতে তড়িৎ প্রবাহ উদ্ভবের ফলে কুণ্ডলীর সম্মুখ তলে সমমেরু সৃষ্টি হয় যা বিকর্ষণ বলের কারণে কুণ্ডলীর অগ্রসরকে বাধা দেয়। আবার চুম্বকের N-মেরু কুণ্ডলী থেকে প্রত্যাগমনের সময় কুণ্ডলীর সম্মুখ তলে বিপরীত দক্ষিণ মেরুর উদ্ভব হওয়ায় কুণ্ডলী ও চুম্বকের মধ্যে আকর্ষণ বল ক্রিয়া করে। সুতরাং, অগ্রগমনের সময় বিকর্ষণ বলের বিরুদ্ধে এবং প্রত্যাগমনের সময় আকর্ষণ বলের বিরুদ্ধে কাজ করতে হয়। এ কাজ করার জন্য যান্ত্রিক শক্তির প্রয়োজন হয় যা রূপান্তরিত হয়ে কুণ্ডলীতে তড়িৎ শক্তি সৃষ্টি করে। ফলে কুণ্ডলীতে তড়িৎ প্রবাহ ঘটে। সুতরাং, দেখা যাচ্ছে, তড়িৎ চৌম্বকীয় আবেশের ক্ষেত্রে লেন্জ-এর সূত্র শক্তির নিত্যতা সূত্র মেনে চলে।

প্রশ্ন : লেন্জ এর সূত্র শক্তির নিত্যতা সূত্র অনুসরণ করে—ব্যাখ্যা কর।

তড়িৎ চৌম্বক আবেশের ফলে আমরা দেখতে পাই যে, কোনো বন্ধ কুণ্ডলীতে তড়িচ্চালক শক্তির উৎস ছাড়াই তড়িৎ প্রবাহ উৎপন্ন হচ্ছে। আপাতদৃষ্টিতে এটি শক্তির নিত্যতার ব্যতিক্রম বলে মনে হয়। কিন্তু প্রকৃতপক্ষে তড়িৎ চৌম্বক আবেশে শক্তির নিত্যতা সূত্র বিরোধী কোনো ঘটনা ঘটে না। লেন্জের সূত্র থেকে আমরা জানি, কোনো কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তি এর সৃষ্টির কারণকেই বাধা দেয়। কোনো কুণ্ডলী ও চুম্বকের মধ্যবর্তী আপেক্ষিক গতির জন্য কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহের উদ্ভব হয় যা ওই আপেক্ষিক গতিকে বাধা দেয়। সুতরাং ওই গতি বজায় রাখার জন্য সর্বদা কিছু যান্ত্রিক শক্তি ব্যয় করতে হয়। এই যান্ত্রিক শক্তিই তড়িৎ শক্তিতে রূপান্তরিত হয়ে কুণ্ডলীতে তড়িৎ প্রবাহের সৃষ্টি করে। সুতরাং তড়িৎ প্রবাহের চৌম্বক ক্রিয়া শক্তির নিত্যতা সূত্র মেনে চলে অর্থাৎ লেন্জের সূত্র শক্তির নিত্যতা সূত্র অনুসরণ করে।

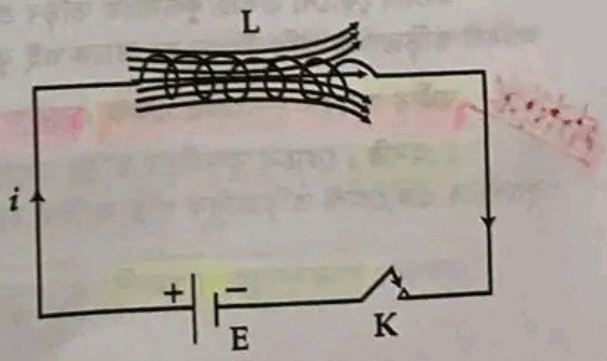
৫.৭ স্বকীয় আবেশ ও পারস্পরিক আবেশ
Self induction and mutual induction

৫.৭.১ স্বকীয় আবেশ
Self induction

যখন কোনো বন্ধ কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে তড়িৎ প্রবাহিত হয় তখন ওই প্রবাহ চৌম্বক ক্ষেত্র উৎপন্ন করে এবং কুণ্ডলী নিজে ওই চৌম্বক ক্ষেত্ররেখার সাথে জড়িত হয়ে পড়ে। কাজেই ওই কুণ্ডলীতে তড়িৎ প্রবাহমাত্রার পরিবর্তন ঘটলে কুণ্ডলীর সাথে জড়িত বা কুণ্ডলী দিয়ে অতিক্রমকারী চৌম্বক ক্ষেত্ররেখারও পরিবর্তন ঘটে এবং কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তির উদ্ভব হয় যা মূল তড়িৎ প্রবাহের এই পরিবর্তনকে বাধা দেয়। একে **স্বকীয় আবেশ** বলে।

চিত্র ৫.৯

চিত্র ৫.৯-এ একটি কুণ্ডলী L, তড়িৎ কোষ E ও টেপা চাবি K দ্বারা একটি তড়িৎ বর্তনী দেখানো হয়েছে। টেপা চাবি চেপে ধরলে বর্তনীতে তড়িৎ প্রবাহ শুরু হয় এবং নির্দিষ্ট স্থির মানে পৌঁছায়। এই স্থির মানে পৌঁছতে '0' হতে 't' সময় লাগে। বর্তনী চালু থেকে t সময় পর্যন্ত কুণ্ডলীর ভেতর তড়িৎ প্রবাহের বৃদ্ধির জন্য চৌম্বক ক্ষেত্ররেখা বা ফ্লাক্সের বৃদ্ধি হয়, ফলে ফ্যারাডের সূত্রানুযায়ী কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহের সৃষ্টি হয়, যা মূল তড়িৎ প্রবাহকে বাধা দেয়। তড়িৎ প্রবাহ স্থির মানে পৌঁছালে কুণ্ডলীতে ফ্লাক্সের পরিবর্তন হয় না বিধায় আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহ থাকে না। আবার, টেপা চাবি উঠিয়ে নিলে অর্থাৎ বর্তনীর সংযোগ বিচ্ছিন্ন করলে মূল তড়িৎ প্রবাহ শূন্য মানে নেমে আসতে কিছু সময় লাগে। এ সময়ে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহের সৃষ্টি হয়, যা মূল প্রবাহ সমদিকে অর্থাৎ একই দিকে হওয়ায় মূল প্রবাহ হ্রাসে বাধা দেয়। উপরোক্ত ঘটনাকে **স্বকীয় আবেশ** বা স্বাবেশ বলে।



অর্থাৎ একটি মাত্র বন্ধ কুণ্ডলীতে অসম তড়িৎ প্রবাহের দরুন চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তনের ফলে অথবা কোনো চৌম্বক ক্ষেত্রে বন্ধ কুণ্ডলীর গতির ফলে যে তড়িৎ চৌম্বক আবেশ ঘটে তাকে স্বকীয় আবেশ বলে।

৫·৭·২ স্বকীয় আবেশ গুণাঙ্ক বা স্বাবেশ গুণাঙ্ক
Coefficient of self induction or self inductance

পরীক্ষার সাহায্যে দেখা গেছে যে, কোনো কুণ্ডলী দ্বারা আবদ্ধ অর্থাৎ কুণ্ডলী দিয়ে অতিক্রমকারী চৌম্বক ফ্লাক্স ওই কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে প্রবাহিত তড়িৎ প্রবাহের সমানুপাতিক।

মনে করি কোনো কুণ্ডলীতে i তড়িৎ প্রবাহের জন্য আবদ্ধ চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিমাণ φ

$\therefore$ আমরা পাই, $\varphi \propto i$

বা, $\varphi = Li$ ... ... (5.8)

এখানে L একটি ধ্রুবক। একে স্বকীয় আবেশ গুণাঙ্ক বলে। কুণ্ডলীর জ্যামিতিক গুণনীয়ক (geometrical factor) এবং মাধ্যমের চৌম্বক প্রবেশ্যতার ওপর এর মান নির্ভর করে।

এখন ভাষায় L-এর সংজ্ঞা দেয়া যাক।

যদি $i = 1$ (একক) হয়, তবে সমীকরণ (5.8) হতে পাই, $\varphi = L$

অতএব, কোনো কুণ্ডলীর মধ্যে এক একক তড়িৎ প্রবাহ চললে তার মধ্যে যে পরিমাণ চৌম্বক ফ্লাক্স অবস্থান করে তথা আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তি আবিষ্ট হয় তাকে ওই কুণ্ডলীর স্বকীয় আবেশ গুণাঙ্ক বলে।

আবার, ফ্যারাডের সূত্রানুসারে,

$$E = -\frac{d\varphi}{dt} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (5.9)$$

$$\therefore \quad E = -\frac{d}{dt}(Li)$$

$$= -L\frac{di}{dt} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (5.10)$$

ঋণাত্মক চিহ্ন বুঝায় যে আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তি সর্বদা প্রবাহমাত্রার পরিবর্তনে বাধা প্রদান করে।

সমীকরণ (5.10) হতে L-এর সংজ্ঞা দেয়া যায়।

$$E = L\frac{di}{dt} \quad [\text{ ঋণ চিহ্ন অগ্রাহ্য করে }]$$

বা, $L = \frac{E}{di/dt}$ ... ... (5.11)

এখন $\frac{di}{dt} = 1$ হলে, $L = E$ ... ... (5.12)

অতএব কোনো একটি কুণ্ডলীতে তড়িৎ প্রবাহমাত্রা প্রতি সেকেণ্ডে এক একক পরিবর্তিত হলে ওই কুণ্ডলীতে যে আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তি উৎপন্ন হয় তাকে ওই কুণ্ডলীর স্বকীয় আবেশ গুণাঙ্ক বলে।

স্বকীয় আবেশ গুণাঙ্কের একক : স্বকীয় আবেশ গুণাঙ্কের এস. আই. একক হেনরি (henry)।

1 হেনরি : কোনো কুণ্ডলীতে তড়িৎ প্রবাহমাত্রা প্রতি সেকেণ্ডে এক অ্যাম্পিয়ার হিসেবে পরিবর্তিত হলে যদি ওই কুণ্ডলীতে এক ভোল্ট তড়িচ্চালক শক্তি আবিষ্ট হয় তবে কুণ্ডলীর আবেশ গুণাঙ্ককে 1 হেনরি বলে।

অতএব, সংজ্ঞানুসারে, 1 হেনরি $= \frac{1 \text{ ভোল্ট}}{1 \text{ অ্যাম্পিয়ার/সে.}}$

$$= 1\frac{\text{ভোল্ট-সেকেণ্ড}}{\text{অ্যাম্পিয়ার}} \text{ (V-s/A)}$$

হেনরি একক খুব বড় মানের হওয়ায় মিলি-হেনরি ও মাইক্রো-হেনরি এককও ব্যবহার করা হয়।

1 হেনরি = 10^3 মিলি-হেনরি = 10^6 মাইক্রো-হেনরি

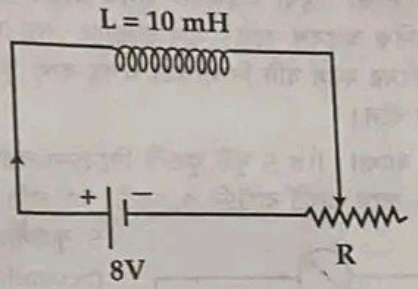
1 মিলি-হেনরি = 10^{-3} হেনরি

1 মাইক্রো-হেনরি = 10^{-6} হেনরি।

অনুশীলনমূলক কাজ : চিত্রে প্রদর্শিত বর্তনীতে 8V ব্যাটারির সাথে 10 mH স্বাবেশাঙ্কের একটি আবেশক L এবং একটি পরিবর্তনশীল রোধ R যুক্ত আছে। ওই রোধের ভ্রাম্যমাণ তড়িৎ সংযোগ বিন্দুকে ডান দিকে সরালে রোধের পরিমাণ বৃদ্ধি পায়। চিত্রে যেভাবে দেখানো আছে, সেই অবস্থায় রোধ 16Ω। ওই মুহূর্তে বর্তনীর প্রবাহ 0·5A অপেক্ষা বেশি হবে, না কম হবে ?

ভ্রাম্যমাণ বিন্দুকে সরালে বর্তনীর প্রবাহমাত্রার পরিবর্তন হবে। তড়িৎচুম্বকীয় সূত্রানুসারে আবেশকে (inductor) তড়িচ্চালক বলের উৎপত্তি হবে। প্রবাহমাত্রার পরিবর্তনের হার $\frac{di}{dt}$ হলে, আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল $E = -L\frac{di}{dt}$। ফলে বর্তনীর লব্ধ তড়িচ্চালক বল হবে $= (8V - L\frac{di}{dt})$ এবং ওই মুহূর্তে

বর্তনীর প্রবাহমাত্রা $= \left(\frac{8V - L\frac{di}{dt}}{16\Omega}\right)$ ... ... (i)



তাই ভ্রাম্যমাণ সংযোগ বিন্দুকে ডান দিকে সরাতে থাকলে, বর্তনীর রোধ ক্রমশ বৃদ্ধি পাবে অথবা বর্তনীর প্রবাহমাত্রা ক্রমশ হ্রাস পাবে অর্থাৎ $\frac{di}{dt}$ ঋণাত্মক হবে। ফলে (i)নং সমীকরণে লব 8V অপেক্ষা বেশি হবে এবং ওই মুহূর্তে বর্তনীর প্রবাহামাত্রা $i = \frac{8V}{16\Omega} = 0{\cdot}5A$ অপেক্ষা বেশি হবে।

গাণিতিক উদাহরণ ৫.২

১। একটি কুণ্ডলীতে 1·015 s সময়ে তড়িৎ প্রবাহ 0·1A থেকে 0·5A-তে পরিবর্তিত হওয়ায় ওই কুণ্ডলীতে 10V তড়িৎ চালক শক্তি আবিষ্ট হয়। কুণ্ডলীটির স্বকীয় আবেশাঙ্ক নির্ণয় কর।

[রা. বো. ২০১১; কু. বো. ২০০৯; চ. বো. ২০০৩; ঢা. বো. ২০০০]

আমরা জানি,

$E = L\frac{di}{dt}$

$\therefore 10 = L \times \frac{0{\cdot}4}{1{\cdot}015}$

$\therefore L = \frac{10 \times 1{\cdot}015}{0{\cdot}4} = 25{\cdot}375$ henry

এখানে,

$E = 10$ V

$di = (0{\cdot}5A - 0{\cdot}1A) = 0{\cdot}4A$

$dt = 1{\cdot}015$ s

২। 100 পাকবিশিষ্ট একটি কুণ্ডলীতে 4A তড়িৎ প্রবাহ চালালে 0·02 Wb চৌম্বক ফ্লাক্স উৎপন্ন হয়। কুণ্ডলীর স্বকীয় আবেশ গুণাঙ্ক নির্ণয় কর। [য. বো. ২০০৫]

$\varphi = Li$

বা, $L = \frac{\varphi}{i}$

$= \frac{2}{4} = 0{\cdot}5$ henry

এখানে,

$N = 100$

$\therefore \varphi = 100 \times 0{\cdot}02$ Wb $= 2$ Wb

$i = 4A$

$L = ?$

কাজ : একটি বৃত্তাকার কুণ্ডলীর অক্ষ বরাবর একটি বেলনাকার দণ্ড চুম্বক রাখা আছে। চুম্বকটিকে উহার নিজ অক্ষের সাপেক্ষে ঘুরালে ওই কুণ্ডলীতে কোনো তড়িৎ প্রবাহ আবিষ্ট হবে কি ? যুক্তিসহ ব্যাখ্যা কর।

হিসাব কর : একটি কুণ্ডলীর স্বকীয় আবেশ গুণাঙ্ক 3mH। এই কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে তড়িৎ প্রবাহ $I = t^2e^{-t}$ (এখানে t = সময়)। শুরুর মুহূর্ত থেকে কত সময় পরে আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল শূন্য হবে ?

আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল, $e = -L\frac{dI}{dt}$; এখানে $I = t^2e^{-t}$

সুতরাং, $\frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt}(t^2e^{-t}) = 2te^{-t} - t^2e^{-t} = -e^{-t}(t-2)$

অতএব, $e = Le^{-t}(t-2)$

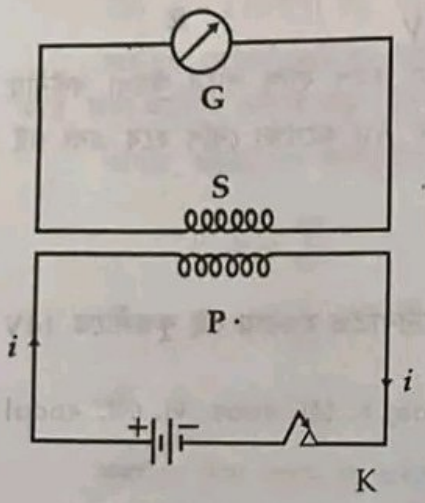
এখন, $t = 0$ বা $t = 2s$ হলে e-এর মান শূন্য হবে। অর্থাৎ শুরুর মুহূর্ত হতে 2s পরে আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল শূন্য হবে।

৫·৭·৩ পারস্পরিক আবেশ
Mutual induction

দুটি কুণ্ডলী পাশাপাশি অবস্থানে রেখে একটির ভেতর দিয়ে তড়িৎ প্রবাহের পরিবর্তন ঘটালে অপর কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তির উদ্ভব হয় এবং দ্বিতীয় কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহ সৃষ্টি হয়। এ ঘটনাকে পারস্পরিক আবেশ বলে।

সংজ্ঞা : মুখ্য বর্তনীতে অসম তড়িৎ প্রবাহের ফলে গৌণ কুণ্ডলীতে যে তড়িৎ চৌম্বক আবেশ ঘটে, তাকে পারস্পরিক আবেশ বলে। সাধারণভাবে বলা যায় যে, এক কুণ্ডলীতে অসম তড়িৎ প্রবাহে সৃষ্ট চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তনের ফলে যদি নিকটবর্তী অপর বন্ধ কুণ্ডলীতে তড়িৎ চৌম্বক আবেশ ঘটে তবে ওই আবেশকে পারস্পরিক আবেশ বলে।

ব্যাখ্যা : P ও S দুটি কুণ্ডলী বিবেচনা করা যাক। এদেরকে পরস্পরের খুব কাছাকাছি অবস্থানে রাখা হয়েছে। P কুণ্ডলীর সাথে একটি ব্যাটারি ও একটি টেপা চাবি সংযুক্ত রয়েছে [চিত্র ৫·১০]। একে মুখ্য কুণ্ডলী (Primary coil) বলে। S কুণ্ডলীর সঙ্গে একটি গ্যালভানোমিটার যুক্ত রয়েছে। একে গৌণ কুণ্ডলী (Secondary coil) বলে। এখন টেপা চাবি চেপে মুখ্য কুণ্ডলী P-তে তড়িৎ সংযোগ স্থাপন করলে গৌণ কুণ্ডলী S-এর গ্যালভানোমিটারে বিক্ষেপ দেখাবে। চাবি ছেড়ে দিয়ে বর্তনী সংযোগ বিচ্ছিন্ন করলে গ্যালভানোমিটারে পুনরায় বিক্ষেপ দেখাবে। তবে এ বিক্ষেপ পূর্বের বিক্ষেপের বিপরীত দিকে হবে।



চিত্র ৫·১০

মুখ্য কুণ্ডলীর বর্তনী সংযোগ বিচ্ছিন্ন করার ফলে গৌণ কুণ্ডলীতে তড়িৎ প্রবাহের কারণ নিম্নরূপ :

টেপা চাবি চেপে ধরলে বর্তনীতে তড়িৎ প্রবাহ শূন্য থেকে বৃদ্ধি পেয়ে একটি নির্দিষ্ট মানে পৌঁছায়। তড়িৎ প্রবাহের এই পরিবর্তনের জন্য গৌণ কুণ্ডলীর ভেতর দিয়ে অতিক্রান্ত চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তন ঘটে; ফলে ফ্যারাডের সূত্রানুসারে গৌণ কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তির উদ্ভব হয় যার জন্য গৌণ কুণ্ডলীতে তড়িৎ প্রবাহের সৃষ্টি হয়। গৌণ কুণ্ডলীতে এই আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহের জন্য গ্যালভানোমিটার বিক্ষেপ দেখায়। টেপা চাবি ছেড়ে দিয়ে বর্তনীর সংযোগ বিচ্ছিন্ন করলে মুখ্য কুণ্ডলীতে তড়িৎ প্রবাহ নির্দিষ্ট স্থির মান থেকে কমে শূন্যে পৌঁছায়। এই সময়ে গৌণ কুণ্ডলীতে ফ্লাক্সের পরিবর্তন ঘটে, ফলে তড়িচ্চালক শক্তি উৎপন্ন হয়। এই তড়িচ্চালক শক্তির অভিমুখ পূর্বের তড়িচ্চালক শক্তির বিপরীতমুখী হওয়ায় আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহও বিপরীতমুখী হয়; ফলে গ্যালভানোমিটারের বিক্ষেপও বিপরীতমুখী হয়।

মনে রাখতে হবে, তড়িৎ প্রবাহের মান যখন স্থির কিংবা শূন্য থাকে তখন গ্যালভানোমিটার কোনো বিক্ষেপ দেখাবে না; কেননা তখন গৌণ কুণ্ডলীতে ফ্লাক্সের কোনো পরিবর্তন ঘটে না।

মনে করি, মুখ্য কুণ্ডলী P-তে i তড়িৎ প্রবাহের জন্য গৌণ কুণ্ডলী S [চিত্র ৫·১০] দিয়ে অতিক্রান্ত চৌম্বক ফ্লাক্সের মান φ।

আমরা জানি, $\varphi \propto i$

বা, $\varphi = Mi$ ... ... (5.13)

এখানে, M একটি ধ্রুবক, একে পারস্পরিক আবেশ গুণাঙ্ক বলে। ... ... (5.14)

এখন ভাষায় এর সংজ্ঞা দেয়া যাক।

যদি $i = 1$ (একক) হয়, তবে সমীকরণ (5.14) হতে পাই, $\varphi = M$

অতএব, **কোনো কুণ্ডলীতে একক তড়িৎ প্রবাহ চললে গৌণ কুণ্ডলীতে যত সংখ্যক চৌম্বক ফ্লাক্স আবদ্ধ হয় তাকে পারস্পরিক আবেশ গুণাঙ্ক বলে।**

আবার ফ্যারাডের সূত্র হতে পাই,

$$E = \frac{d\varphi}{dt} \quad [\text{ ঋণ চিহ্ন অগ্রাহ্য করে }]$$

বা, $E = \frac{d}{dt}(Mi) = M\frac{di}{dt}$ ... ... (5.15)

এখন, $\frac{di}{dt} = 1$ হলে, $E = M$ হয়।

অতএব, কোনো মুখ্য কুণ্ডলীতে তড়িৎ প্রবাহমাত্রা প্রতি সেকেণ্ডে এক একক পরিবর্তিত হলে গৌণ কুণ্ডলীতে যে আবিষ্ট তড়িচ্চালক বল উৎপন্ন হয় তাকে পারস্পরিক আবেশ গুণাঙ্ক বলে।

পারস্পরিক আবেশ গুণাঙ্কের একক : স্বকীয় আবেশ গুণাঙ্কের ন্যায় পারস্পরিক আবেশ গুণাঙ্কের এস. আই. (S. I.) একক হেনরি (henry)। এছাড়া মিলি-হেনরি (mh) (10^{-3} henry) এবং মাইক্রো-হেনরি (μh) (10^{-6} henry)-কে পারস্পরিক আবেশ গুণাঙ্কের একক ধরা হয়।

'পারস্পরিক আবেশ গুণাঙ্ক 1 হেনরি'-এর অর্থ দুটি কুণ্ডলীর একটির মধ্য দিয়ে 1 As^{-1} হারে তড়িৎ প্রবাহের পরিবর্তন ঘটলে যদি গৌণ কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তি 1V হয়, তবে কুণ্ডলীদ্বয়ের পারস্পরিক আবেশ গুণাঙ্ক হবে 1 হেনরি।

গাণিতিক উদাহরণ ৫.৩

১। কোনো মুখ্য কুণ্ডলীতে 0·05 s-এ তড়িৎ প্রবাহমাত্রা 6A হতে 1A-তে আনলে গৌণ কুণ্ডলীতে 5 ভোল্ট তড়িচ্চালক শক্তি আবিষ্ট হয়। কুণ্ডলীদ্বয়ের পারস্পরিক আবেশ গুণাঙ্ক কত ? [ঢা. বো. ২০১১; ব. বো. ২০০২]

আমরা জানি,

$$E = M\frac{di}{dt}$$

$$\therefore\ 5 = M \times \frac{5}{0{\cdot}05}$$

$$\therefore\ M = \frac{5 \times 0{\cdot}05}{5} = 0{\cdot}05 \text{ হেনরি}$$

এখানে,

$di = 6A - 1A = 5A$

$dt = 0{\cdot}05\ s$

$E = 5$ ভোল্ট

২। পরস্পরের কাছাকাছি দুটি কুণ্ডলী A ও B-এর পাক সংখ্যা যথাক্রমে 200 ও 1000। কুণ্ডলী A দিয়ে 2A তড়িৎ প্রবাহে A কুণ্ডলীতে $2{\cdot}4 \times 10^{-4}$ Wb এবং B কুণ্ডলীতে $1{\cdot}6 \times 10^{-4}$ Wb চৌম্বক ফ্লাক্স উৎপন্ন হয়। (ক) A কুণ্ডলীর স্বকীয় আবেশ গুণাঙ্ক (খ) B কুণ্ডলীর পারস্পরিক আবেশ গুণাঙ্ক এবং (গ) A-তে প্রবাহমাত্রা 0·4 s-এ থেমে গেলে B কুণ্ডলীতে আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তি নির্ণয় কর।

(ক) মনে করি, A কুণ্ডলীর স্বকীয় আবেশ গুণাঙ্ক $= L$

∴ আমরা পাই

$$\varphi_A = Li \quad \ldots \quad \ldots \quad \text{(i)}$$

এখন সমীকরণ (i) হতে পাই,

$$200 \times 2{\cdot}4 \times 10^{-4} = L \times 2$$

$$\therefore\ L = \frac{200 \times 2{\cdot}4 \times 10^{-4}}{2} = 0{\cdot}024\ h$$

এখানে,

φ_A = পাক সংখ্যা × চৌম্বক ফ্লাক্স
$= 200 \times 2{\cdot}4 \times 10^{-4}$ Wb

$i = 2A$

(খ) মনে করি B-তে পারস্পরিক আবেশ গুণাঙ্ক $= M$

∴ আমরা পাই

$$\varphi_B = Mi \quad \ldots \quad \ldots \quad \text{(ii)}$$

এখন সমীকরণ (ii) হতে পাই,

$$1000 \times 1{\cdot}6 \times 10^{-4} = M \times 2$$

$$\therefore\ M = \frac{1000 \times 1{\cdot}6 \times 10^{-4}}{2} = 0{\cdot}08\ h$$

এখানে,

φ_B = পাক সংখ্যা × চৌম্বক ফ্লাক্স
$= 1000 \times 1{\cdot}6 \times 10^{-4}$ Wb

$i = 2A$

(গ) মনে করি B-তে গড় আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তি $= E$

∴ আমরা পাই

$$E = M\frac{di}{dt} \quad \ldots \quad \ldots \quad \text{(iii)}$$

এখন সমীকরণ (iii) হতে পাই,

$$E = 0{\cdot}08 \times 5$$
$$= 0{\cdot}4 \text{ volt}$$

এখানে,

$M = 0{\cdot}08\ h$

$\frac{di}{dt} = \frac{2}{0{\cdot}4} = 5\ As^{-1}$

পারস্পরিক আবেশের ব্যবহার
Use of mutual inductance

রূপান্তরক বা ট্রান্সফরমার (Transformer) : যে যন্ত্রের সাহায্যে পর্যাবৃত্ত বা দিক পরিবর্তী উচ্চ বিভবকে নিম্ন বিভবে অথবা নিম্ন বিভবকে উচ্চ বিভবে রূপান্তর করা যায় তাকে রূপান্তরক বা ট্রান্সফরমার বলে। ট্রান্সফরমার দুই ধরনের—

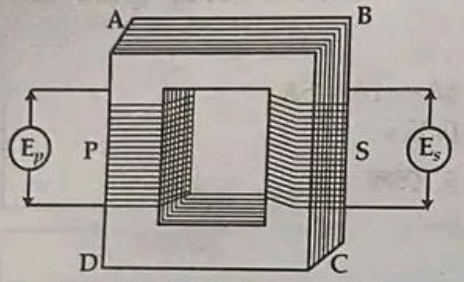
(১) আরোহী বা স্টেপ আপ ট্রান্সফরমার (২) অবরোহী বা স্টেপ ডাউন ট্রান্সফরমার।

যে ট্রান্সফরমার অল্প বিভবের অধিক তড়িৎ প্রবাহকে অধিক বিভবের অল্প তড়িৎ প্রবাহে রূপান্তরিত করে তাকে আরোহী বা স্টেপ আপ ট্রান্সফরমার বলে।

আর যে ট্রান্সফরমার অধিক বিভবের অল্প তড়িৎ প্রবাহকে অল্প বিভবের অধিক তড়িৎ প্রবাহে রূপান্তরিত করে তাকে অবরোহী বা স্টেপ ডাউন ট্রান্সফরমার বলে।

একটি ট্রান্সফরমারের গঠন ও কার্যপ্রণালি নিম্নে দেওয়া হলো :

গঠন : একটি কাঁচা লোহার কোর বা মজ্জার (core) ওপর একটি অন্তরীত তারের দুটি কুণ্ডলী জড়িয়ে ট্রান্সফরমার তৈরি করা হয় [চিত্র ৫.১১]। এর একটি মুখ্য কুণ্ডলী, অপরটি গৌণ কুণ্ডলী। কোরটি সাধারণত বৃত্তাকার বা আয়তাকার গঠনের হয় এবং কাঁচা লোহার কতকগুলো পাতকে আঁটি বেঁধে কোরটি তৈরি করা হয়। চিত্রে ABCD আয়তাকার গঠনের কোর এবং P ও S যথাক্রমে মুখ্য ও গৌণ কুণ্ডলী। মুখ্য কুণ্ডলীতে পরিবর্তী বিভব E_p প্রয়োগ করলে গৌণ কুণ্ডলীতে পরিবর্তী বিভব E_S উৎপন্ন হয় এবং তাকে কোনো লাইনে সরবরাহ করা হয়। মুখ্য এবং গৌণ্য কুণ্ডলীতে তার এমনভাবে কোরের ওপর জড়ানো থাকে যাতে বৈদ্যুতিক শক্তির ক্ষরণ যথাসম্ভব কম হয়। আদর্শ ট্রান্সফরমারের ক্ষরণ (leakage) শূন্য হয়।



চিত্র ৫.১১

কার্যনীতি (Principle) : মনে করি, মুখ্য কুণ্ডলীতে প্রযুক্ত পরিবর্তী তড়িচ্চালক শক্তি = E_p। ধরি মুখ্য কুণ্ডলীর প্রবাহমাত্রা = i_p। তা হলে এই পরিবর্তী প্রবাহমাত্রা এর কোরে চৌম্বক ফ্লাক্স উৎপন্ন করবে। ফলে মুখ্য কুণ্ডলীতে একটি বিপরীত তড়িচ্চালক শক্তির উদ্ভব হবে, যা আদর্শ অবস্থায় E_p-এর সমান হবে।

মনে করি, n_p পাকবিশিষ্ট মুখ্য কুণ্ডলীর প্রতিটি পাক সংখ্যার মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত চৌম্বক ফ্লাক্স = φ

$$\therefore \quad E_p = n_p \frac{d\varphi}{dt} \quad \ldots \quad \ldots \quad \text{(ঋণ চিহ্ন অগ্রাহ্য করে)} \quad (5.16)$$

এবং n_s পাকবিশিষ্ট গৌণ কুণ্ডলীতে একই চৌম্বক ফ্লাক্স জড়িত হেতু আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তি

$$E_s = n_s \frac{d\varphi}{dt} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (5.17)$$

এক্ষেত্রে চৌম্বক ফ্লাক্সের ক্ষরণ (leakage) নগণ্য বিবেচনা করা হয়েছে।

$$\therefore \quad \frac{E_s}{E_p} = \frac{n_s}{n_p} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (5.18)$$

অর্থাৎ আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তি এবং প্রযুক্ত তড়িচ্চালক শক্তির অনুপাত গৌণ ও মুখ্য কুণ্ডলীর পাক সংখ্যার অনুপাতের সমান। এ অনুপাতকে **পাক সংখ্যা অনুপাত** (turn-ratio) বলে।

সুতরাং **কুণ্ডলী দুটির ভোল্ট মাত্রা তাদের পাক সংখ্যার সমানুপাতিক**। যদি $n_p < n_s$ হয় তবে $E_p < E_s$ হবে।

শক্তির নিত্যতা সূত্র অনুসারে মুখ্য কুণ্ডলীর ওপর প্রতি সেকেন্ডে ব্যয়িত শক্তি গৌণ কুণ্ডলীর ওপর ব্যয়িত শক্তির সমান হবে অর্থাৎ **মুখ্য ও গৌণ কুণ্ডলীর ওয়াট মাত্রা সমান হবে**। গৌণ কুণ্ডলীর ওয়াট মাত্রাই ট্রান্সফরমারের বহিঃক্ষমতা নির্দেশ করে।

$$\therefore \quad E_p \times i_p = E_s \times i_s$$

$$\text{বা,} \quad \frac{i_p}{i_s} = \frac{E_s}{E_p} = \frac{n_s}{n_p} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (5.19)$$

$$\text{বা,} \quad \frac{i_p}{i_s} = \frac{n_s}{n_p} \quad \text{বা} \quad i \propto \frac{1}{n} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (5.20)$$

অতএব, **কুণ্ডলী দুটির তড়িৎ প্রবাহমাত্রা তাদের পাক সংখ্যার ব্যস্তানুপাতিক**।

যখন $N_s > N_p$ তখন $E_s > E_p$; অর্থাৎ ট্রান্সফরমারটি আরোহী বা স্টেপ আপ (step up), আবার যখন $N_s < N_p$ তখন $E_s < E_p$। এক্ষেত্রে ট্রান্সফরমারটি অবরোহী বা স্টেপ ডাউন (step down)।

জানা দরকার : ১। ট্রান্সফরমারের মুখ্য কুণ্ডলীতে প্রযুক্ত তড়িচ্চালক বল ও গৌণকুণ্ডলীতে তড়িচ্চালক বলের দশা পার্থক্য হয় 180°।

২। ট্রান্সফরমার শুধুমাত্র পরিবর্তী ভোল্টেজে কাজ করে।

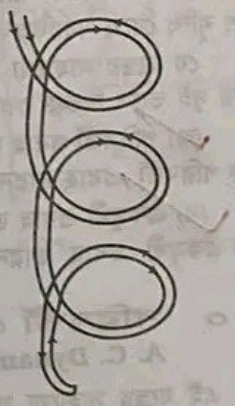
৩। ইনপুট ও আউটপুট পরিবর্তী ভোল্টেজের কম্পাঙ্ক একই থাকে।

সম্প্রসারিত কাজ : ট্রান্সফরমারের মুখ্য কুণ্ডলী ডিসি উৎসের পরিবর্তে এসি উৎসের সাথে যুক্ত করা হয় কেন ?

ট্রান্সফরমারের মুখ্য কুণ্ডলীতে প্রযুক্ত পরিবর্তনশীল বিভব পরিবর্তনশীল চৌম্বক ফ্লাক্স উৎপন্ন করে; ফলে গৌণ কুণ্ডলীতে সংশ্লিষ্ট চৌম্বক ফ্লাক্সেরও পরিবর্তন হয় যার ফলে গৌণ কুণ্ডলীতে তড়িচ্চালক শক্তি আবিষ্ট হয়। ইহা ট্রান্সফরমারের মূলনীতি; কিন্তু মুখ্য কুণ্ডলীতে ডিসি উৎস যুক্ত করলে পরিবর্তনশীল চৌম্বক ফ্লাক্স উৎপন্ন হয় না ফলে গৌণ কুণ্ডলীতে কোনো তড়িচ্চালক শক্তি আবিষ্ট হয় না। তাই মুখ্য কুণ্ডলীতে এসি উৎস যুক্ত করলে পরিবর্তিত চৌম্বক ফ্লাক্সের উদ্ভব হয়, ফলে গৌণ কুণ্ডলীতে সংশ্লিষ্ট চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তন ঘটিয়ে তড়িচ্চালক শক্তি আবিষ্ট হয়।

৫·৮ আবেশহীন কুণ্ডলী
Non-inductive coil

কোনো তারের কুণ্ডলীর ভিতর দিয়ে তড়িৎ প্রবাহিত হলে স্বকীয় আবেশ সৃষ্টি হয়। এ স্বকীয় আবেশ তারের কুণ্ডলীর প্রস্থচ্ছেদ, আকার, পাকসংখ্যা, মাধ্যমের প্রবেশ্যতা ইত্যাদির ওপর নির্ভর করে। অনেক সময় এ স্বকীয় আবেশ পরীক্ষালব্ধ মানের পরিবর্তন এবং পরীক্ষাগারে অন্যান্য কাছাকাছি যন্ত্রপাতির ওপর প্রভাব বিস্তার করে। এ সমস্যা নিরসনের জন্য কুণ্ডলীর তারকে এমনভাবে জড়ানো হয় যাতে স্বকীয় আবেশ শূন্য অথবা নগণ্য মানের হয়। কুণ্ডলী জড়াবার এরূপ পদ্ধতিকে আবেশহীন বেষ্টনী (Non-inductive winding) বলে।

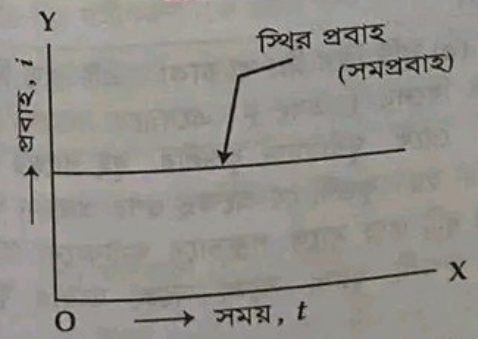

চিত্র ৫·১২

এই পদ্ধতিতে প্রয়োজনীয় দৈর্ঘ্যের একটি কুণ্ডলী তারকে সমান দুই ভাঁজ করে পরস্পরের সাথে অন্তরীত রেখে অন্তরক ববিনের গায়ে কুণ্ডলী আকারে জড়ানো হয় [চিত্র ৫·১২]। এভাবে বেষ্টনের ফলে কুণ্ডলীর এক অর্ধেকের তড়িৎ প্রবাহ অপর অর্ধেকের তড়িৎ প্রবাহের বিপরীতমুখী এবং পাশাপাশি হয় এবং এক অর্ধেকের তড়িৎ প্রবাহের জন্য সৃষ্ট চৌম্বক ফ্লাক্স অপর অর্ধেকের সৃষ্ট চৌম্বক ফ্লাক্সের বিপরীতমুখী হওয়ায় পরস্পরকে প্রশমিত করে। এর অর্থ হলো, এক অর্ধেক তারের স্বকীয় আবেশ অপর অর্ধেকের স্বকীয় আবেশকে বাতিল করে কুণ্ডলীকে স্বকীয় আবেশ শূন্য করে। এভাবে জড়ানো কুণ্ডলীকে আবেশহীন কুণ্ডলী বলে।

৫·৯ সরাসরি প্রবাহ ও দিক পরিবর্তী প্রবাহের ধারণা
Concept of direct current and alternating current

তড়িৎ প্রবাহ দুই ধরনের; যথা—সরাসরি প্রবাহ ও দিক পরিবর্তী প্রবাহ।

সরাসরি প্রবাহ : আমরা জানি যে, সাধারণ তড়িৎ কোষ বা ব্যাটারি হতে যে তড়িৎ প্রবাহ পাওয়া যায় তার অভিমুখ সর্বদা একই থাকে। এই প্রবাহকে **একমুখী প্রবাহ বা সমপ্রবাহ** (Direct current) বলা হয়। একে সংক্ষেপে ডি. সি. (D. C.) লেখা হয়। D.C. কে i বনাম t দ্বারা দেখান হলো [চিত্র ৫·১৩]। এই প্রবাহের মান বা মাত্রা স্থির নাও থাকতে পারে, কিন্তু দিক বা অভিমুখ কখনই পরিবর্তিত হয় না।



চিত্র ৫·১৩

সংজ্ঞা : যে প্রবাহ সময়ের সাথে সাথে দিক বা দশা পরিবর্তন করে না তাকে সরাসরি প্রবাহ (D.C.) বলে।

দিক পরিবর্তী প্রবাহ : তড়িৎ প্রবাহের এমন উৎস আছে যা হতে বর্তনীতে যে প্রবাহ চলে তার অভিমুখ একটি নির্দিষ্ট সময় অন্তর অন্তর স্বতঃস্ফূর্তভাবে উল্টাতে থাকে, এই প্রবাহকে প্রত্যাবর্তী বা দিক পরিবর্তী প্রবাহ (Alternating current) বলে [চিত্র ৫·১৪]। একে সংক্ষেপে এ. সি. (A. C.) লেখা হয়।

আরমেচারের বিভিন্ন অবস্থানে কুণ্ডলীর মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত বলরেখার সংখ্যা পরিবর্তিত হয় সেহেতু আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তির মানও বিভিন্ন সময়ে বিভিন্ন হয়। কুণ্ডলীর একবার পূর্ণ ঘূর্ণনে এর মধ্যে আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তি এবং আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহের অভিমুখ একবার পরিবর্তিত হয়। ফ্লেমিং-এর দক্ষিণ হস্ত নিয়মে আবিষ্ট তড়িৎ প্রবাহের অভিমুখ পাওয়া যাবে। এই প্রবাহ স্লিপ রিং এবং ব্রাশের মধ্য দিয়ে বহিঃবর্তনীতে সরবরাহ হয়।

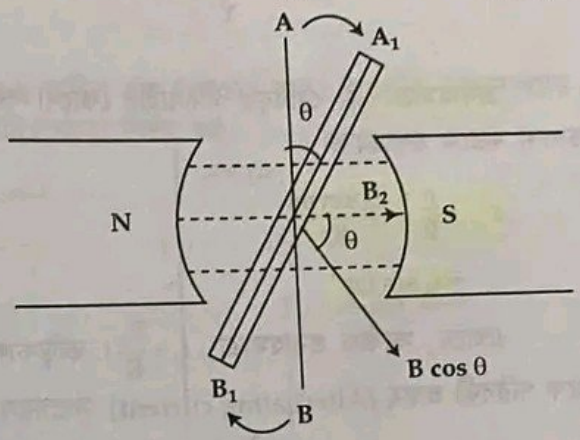
দিক পরিবর্তী প্রবাহ সৃষ্টি
Generation of alternating current

ধরি N এবং S একটি চুম্বকের দুটি মেরু যা H প্রাবল্যের একটি সুষম চৌম্বক ক্ষেত্র সৃষ্টি করেছে [চিত্র ৫·১৭]। মনে করি, AB একটি বন্ধ কুণ্ডলী। এটি চৌম্বক ক্ষেত্রের অভিলম্ব তলে অবস্থিত। কুণ্ডলীটি তার নিজস্ব অনুভূমিক অক্ষে ω কৌণিক বেগে ঘুরছে।

মনে করি, কুণ্ডলীটির পাক সংখ্যা N এবং তার ক্ষেত্রফল A। অতএব কুণ্ডলীর তল চৌম্বক ক্ষেত্ররেখার অভিলম্ব হলে তার মধ্য দিয়ে অতিক্রান্ত চৌম্বক ফ্লাক্স,

$$\varphi = NAB \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (5.21)$$

এখন ধরি কুণ্ডলীটি t সময়ে θ কোণে ঘুরে A_1B_1 অবস্থানে গিয়েছে। এমতাবস্থায় চৌম্বক ক্ষেত্রের অভিলম্ব উপাংশ $= B\cos\theta$



চিত্র ৫·১৭

$\therefore$ অতিক্রান্ত চৌম্বক ফ্লাক্স বা ক্ষেত্ররেখার সংখ্যা,

$$\varphi_N = NAB\cos\theta$$
$$= NAB\cos\omega t \quad \ldots \quad \ldots \quad (5.22)$$
$$[\because \theta = \omega t]$$

যেহেতু কুণ্ডলীটির ঘূর্ণনের জন্য অতিক্রান্ত চৌম্বক ফ্লাক্সের পরিবর্তন ঘটবে, সেহেতু ফ্যারাডের তড়িৎ চৌম্বকীয় আবেশের ফলে কুণ্ডলীতে তড়িচ্চালক শক্তি আবিষ্ট হবে এবং আবিষ্ট তড়িচ্চালক শক্তির মান,

$$E = -\frac{d\varphi_N}{dt}$$
$$= -\frac{d}{dt}(NAB\cos\omega t)$$
$$= NAB\,\omega\sin\omega t \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (5.23)$$
$$\therefore E = E_0\sin\omega t$$

এখানে, $E_0 = NAB\omega$ = সর্বোচ্চ তড়িচ্চালক শক্তি (E_{max})

সমীকরণ (5.23)-কে সাইনুসয়ডাল (sinusoidal) বা দিকপরিবর্তী প্রবাহের সমীকরণ বলা হয়। প্রবাহমাত্রার ক্ষেত্রে উক্ত সমীকরণটিকে লেখা যায় $I = I_0\sin\omega t$ আকারে। এভাবে আমরা দিক পরিবর্তী প্রবাহ পেয়ে থাকি।

কাজ : দিকপরিবর্তী প্রবাহের চক্রের জন্য অর্থাৎ $t = 0$ থেকে $t = 2T$ সময়ের জন্য তড়িচ্চালক শক্তির মান কত হবে? লেখচিত্রে সময়ের খন্ডিত অংশ নির্দেশ করে ব্যাখ্যা কর।

(ক) এখন কুণ্ডলীটির পর্যায় কাল T হলে $\omega = \frac{2\pi}{T}$ হবে।

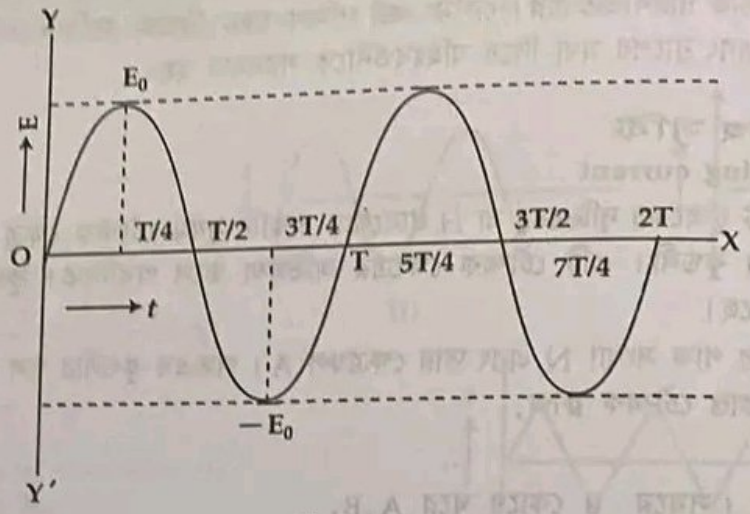
(খ) সমীকরণ (5.23) হতে দেখা যায় E-এর মান ωt-এর ওপর নির্ভর করে।

(গ) যখন $t = 0, \frac{T}{2}, T, \frac{3}{2}T, 2T$ ইত্যাদি হয়, তখন তড়িচ্চালক শক্তি E শূন্য হয়।

(ঘ) $t = \frac{T}{4}, \frac{5}{4}T$ ইত্যাদি হলে $E = +E_0$ এবং $t = \frac{3}{4}T, \frac{7}{4}T$ ইত্যাদি হলে $E = -E_0$ হবে।

অতএব দেখা যাচ্ছে যে, কুণ্ডলীর সঙ্গে তড়িচ্চালক শক্তি E-এর মান শূন্য হতে বৃদ্ধি পেয়ে $+E_0$ এবং এর পর ক্রমশ হ্রাস পেয়ে পুনরায় শূন্য মানে পৌঁছায়। অতঃপর বিপরীত দিকে পুনরায় বৃদ্ধি পেয়ে $-E_0$ হয়; আবার হ্রাস পেয়ে

শূন্য মানে আসে। এমনিভাবে তড়িচ্চালক শক্তির পরিবর্তনের একটি চক্র (cycle) T সময়ে সম্পন্ন হয় যা চিত্র ৫.১৮-এ দেখানো হয়েছে।



চিত্র ৫.১৮

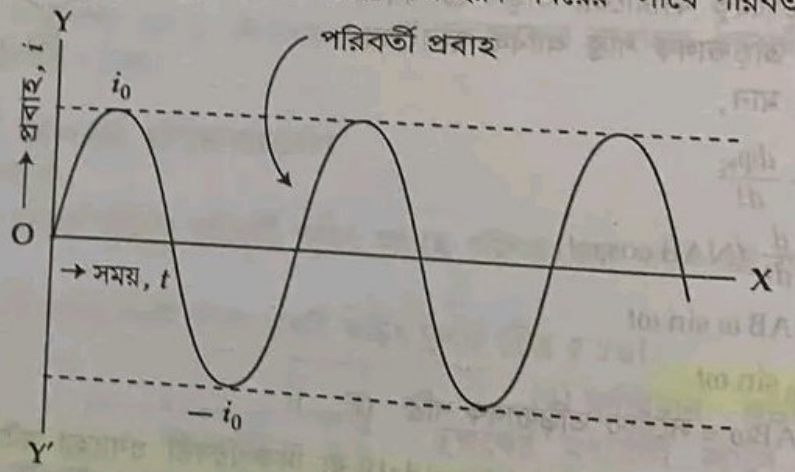
প্রবাহমাত্রা : R রোধযুক্ত পরিবাহীর কোনো বর্তনীতে E তড়িচ্চালক শক্তির জন্য i পরিমাণ প্রবাহ t সময় ধরে চালনা করলে প্রবাহমাত্রা,

$$i = \frac{E}{R} = \frac{E_0 \sin \omega t}{R}$$

$$= i_0 \sin \omega t \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad \ldots \qquad (5.24)$$

এখানে, সর্বোচ্চ প্রবাহমাত্রা, $i_0 = \frac{E_0}{R}$। তড়িচ্চালক শক্তির পরিবর্তনের ফলে প্রবাহমাত্রাও পরিবর্তিত হয়। এজন্য একে পরিবর্তী প্রবাহ (Alternating current) সংক্ষেপে AC বলা হয়। সময়ের সাথে পরিবর্তী প্রবাহের মান ও অভিমুখ

চিত্র ৫.১৯



কীভাবে পরিবর্তিত হয় তা চিত্র ৫.১৯-এ অঙ্কিত লেখের সাহায্যে দেখানো হয়েছে। এই লেখ হতে বলা যায় যে, পরিবর্তী প্রবাহের সমীকরণকে সাইন বা কোসাইন লেখ দ্বারা প্রকাশ করা যায়।

৫.১১ দিক পরিবর্তী প্রবাহ সম্পর্কীয় কয়েকটি রাশির সংজ্ঞা
Some quantities relating alternating current

(ক) বিস্তার (Amplitude) : যে কোনো অভিমুখে তড়িচ্চালক শক্তি বা প্রবাহের সর্বোচ্চ মানকে তার বিস্তার বা শীর্ষমান বলে। চিত্র ৫.১৮ ও ৫.১৯-এ E_0 ও i_0 যথাক্রমে তড়িচ্চালক শক্তি এবং প্রবাহের শীর্ষমান।

(খ) পরিবর্তন চক্র (Cycle of variation) : দিক পরিবর্তী তড়িচ্চালক শক্তি বা প্রবাহের মান শূন্য হতে বৃদ্ধি পেয়ে শীর্ষমান, ক্রমান্বয়ে হ্রাস পেয়ে শূন্যমানে এসে বিপরীত অভিমুখে পুনরায় বৃদ্ধি পেয়ে ওই শীর্ষমানে পৌঁছে বা হ্রাস পেয়ে শূন্যমানে উপনীত হওয়াকে তড়িচ্চালক শক্তি বা প্রবাহের পরিবর্তন চক্র বলে। চিত্র ৫.১৮-এ O হতে T পর্যন্ত এক পরিবর্তন চক্র দেখানো হয়েছে।

(গ) **পর্যায়কাল (Time period) :** যে সময়ে পরিবর্তী তড়িচ্চালক শক্তি বা প্রবাহের একটি পরিবর্তন চক্র সম্পন্ন হয় তাকে পর্যায়কাল বলে। একে T দ্বারা প্রকাশ করা হয়। পর্যায়কাল, $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

(ঘ) **কম্পাঙ্ক (Frequency) :** পরিবর্তী তড়িচ্চালক শক্তি বা প্রবাহ প্রতি সেকেন্ডে যত সংখ্যক পরিবর্তন চক্র সম্পন্ন করে তাকে উক্ত তড়িচ্চালক শক্তি বা প্রবাহের কম্পাঙ্ক বলে। একে f বা n দ্বারা প্রকাশ করা হয়।

$\therefore$ কম্পাঙ্ক, f

বা $n = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$

বা, $\omega = 2\pi f$

বা, $\omega = 2\pi n$

ω-কে কৌণিক কম্পাঙ্কও বলা হয়।

গাণিতিক উদাহরণ ৫.৪

১। একটি আরোহী ট্রান্সফরমারে 200 V সরবরাহ করে 4A তড়িৎ প্রবাহ পওয়া যায়। কুণ্ডলীর পাকসংখ্যার অনুপাত 1 : 10 হলে ট্রান্সফরমারের মুখ্য কুণ্ডলীতে তড়িৎ প্রবাহ ও বহিঃক্ষমতা নির্ণয় কর।

এখানে,

$\frac{N_p}{N_s} = \frac{1}{10}$

$E_p = 200$ V

$I_s = 4$ A

$I_p = ?$

$P = ?$

আমরা পাই,

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

বা, $I_p = \frac{N_s}{N_p} \times I_s$

$= \frac{10}{1} \times 4 = 40$ A

এবং ক্ষমতা, $P = E_s \times I_s$

কিন্তু $\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s}$

$\therefore E_s = \frac{N_s}{N_p} \times E_p = \frac{10}{1} \times 200 \text{ V} = 2000 \text{ V}$

$\therefore P = 2000 \times 4 = 8000 \text{ W} = 8 \text{ kW}$

২। একটি আরোহী ট্রান্সফরমারে 200 V হতে 2000 V পাওয়া গেল। যদি মুখ্য কুণ্ডলীর পাকসংখ্যা 300 এবং রোধ 0·5 Ω হয় তবে গৌণ কুণ্ডলীর পাকসংখ্যা ও রোধ কত হবে ?

এখানে,

$E_p = 200$ V

$E_s = 2000$ V

$N_p = 300$

$R_p = 0{\cdot}5\ \Omega$

$N_s = ?$

$R_s = ?$

আমরা পাই,

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

বা, $\frac{200}{2000} = \frac{300}{N_s}$

$\therefore N_s = \frac{300 \times 2000}{200} = 3000$

আবার, $\frac{R_p}{R_s} = \frac{N_p^2}{N_s^2}$

বা, $R_s = \frac{N_s^2 \times R_p}{N_p^2}$

$= \frac{(3000)^2 \times 0{\cdot}5}{(300)^2} = 50\ \Omega$

৫.১২ প্রবাহের গড় মান, বর্গমূলীয় গড় মান এবং শীর্ষ মান
Mean value, Root Mean Square value and Peak value of current

৫.১২.১ পরিবর্তী প্রবাহের গড় মান ও শীর্ষ মান (অর্ধচক্রের জন্য তড়িৎ প্রবাহের গড় মান)
Average or mean value and peak value of AC

পরিবর্তী প্রবাহের পর্যায়কালে অর্থাৎ প্রবাহের পূর্ণ পরিবর্তন চক্রের কালে প্রবাহের গড় মান শূন্য হয়। সুতরাং পরিবর্তী প্রবাহের গড় মান বলতে অর্ধ পর্যায় কালে প্রবাহের গড় মান বুঝায়। প্রবাহের গড় মানকে $\bar{i}$ দ্বারা প্রকাশ করা হয়। আমরা জানি, পরিবর্তী প্রবাহের সমীকরণ $i = i_0 \sin \omega t$.

অতএব, গড় মান,

$$\bar{i} = \frac{\int_0^{T/2} i\,dt}{T/2} = \frac{\int_0^{T/2} i_0 \sin \omega t . dt}{T/2} \quad \ldots \quad \ldots \quad (5.25)$$

$$= i_0 \int_0^{\pi/\omega} \frac{\sin \omega t . dt}{\pi/\omega} \qquad \left[\because T = \frac{2\pi}{\omega}\right]$$

$$= \frac{i_0 \omega}{\pi}\left[\frac{-\cos \omega t}{\omega}\right]_0^{\pi/\omega} = \frac{i_0}{\pi}[\cos \omega t]_{\pi/\omega}^{0}$$

$$= \frac{i_0}{\pi}\left[1 - \cos\left(\omega \times \frac{\pi}{\omega}\right)\right]$$

$$= \frac{i_0}{\pi}[1 - \cos \pi] = \frac{i_0}{\pi}[1 - (-1)]$$

$$= \frac{2}{\pi} i_0 = 0.637 \times \text{পরিবর্তী প্রবাহের শীর্ষমান} \quad \ldots \quad \ldots \quad (5.26)$$

অর্থাৎ পরিবর্তী প্রবাহের গড় মান = 0.637 × পরিবর্তী প্রবাহের শীর্ষ মান।
সুতরাং পরিবর্তী প্রবাহের গড় মান শীর্ষ মানের 0.637 গুণ বা 63.7%

$$\therefore \text{শীর্ষ মান} = \frac{\text{গড় মান}}{0.637} = 1.57 \times \text{গড় মান} = 1.57 \times \bar{i} \quad \ldots \quad \ldots \quad (5.27)$$

অর্থাৎ পরিবর্তী প্রবাহের শীর্ষ মান গড় মানের 1.57 গুণ।

বি.দ্র. তড়িচ্চালক শক্তির ক্ষেত্রে গড় মান, $\bar{E} = \frac{2}{\pi} E_0 = 0.637 \times E_0$ হয়।

৫.১২.২ বর্গমূলীয় গড় মান
Root mean square value

আমরা জানি দিক পরিবর্তী প্রবাহের সমীকরণ $I = I_0 \sin \omega t$, এখানে I এবং I_0 যথাক্রমে দিক পরিবর্তী প্রবাহের কার্যকর মান এবং শীর্ষ মান। পূর্ণ চক্রের জন্য দিক পরিবর্তী প্রবাহের গড় বর্গ মান

$$\overline{I^2} = \frac{1}{T}\int_0^T I^2 dt = \frac{1}{T}\int_0^T (I_0 \sin \omega t)^2 dt$$

$$= \frac{1}{T}\int_0^T I_0^2 \sin^2 \omega t dt = \frac{I_0^2}{T}\int_0^T \sin^2 \omega t dt$$

$$= \frac{I_0^2}{T}\int_0^T \frac{(1 - \cos 2\omega t)}{2} dt \qquad \left[\because \sin^2 \theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{2}\right]$$

$$= \frac{I_0^2}{2T}\left\{\int_0^T dt - \int_0^T \cos 2\omega t\, dt\right\}$$

$$= \frac{I_0^2}{2T}\left\{[t]_0^T - \frac{1}{2\omega}[\sin 2\omega t]_0^T\right\}$$

$$= \frac{I_0^2}{2T}\left\{[T] - \frac{1}{2\omega}[\sin 2\omega t - \sin 0]\right\}$$

$$= \frac{I_0^2}{2T}\left\{T - \frac{1}{2\omega}[\sin 4\pi - \sin 0]\right\} \qquad [\because \omega = \frac{2\pi}{T}]$$

$$= \frac{I_0^2}{2T}[T - 0] = \frac{I_0^2}{2}$$

$\therefore \sqrt{I^2} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = 0{\cdot}707 \times I_0$

বা, $I_{rms} = 0{\cdot}707 \times I_0$ ... ... (5.28)

অতএব বলা যায় পরিবর্তী প্রবাহের বর্গমূলীয় গড় মান শীর্ষ মানের 0·707 গুণ বা 70·7%.

বি. দ্র. তড়িচ্চালক শক্তির ক্ষেত্রে, $E_{rms} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} = 0{\cdot}707 \times E_0$ হয়।

৫·১২·৩ গড় মান, আপাত মান এবং শীর্ষ মানের মধ্যে পারস্পরিক সম্পর্ক
Mutual relation among the average value, virtual value and peak value

দিক পরিবর্তি তড়িৎ প্রবাহের বর্গের গড় মানের বর্গমূলকে দিক পরিবর্তী তড়িৎ প্রবাহের বর্গমূলীয় গড় মান বা কার্যকর বা আপাত মান বলে।

আমরা জানি, পরিবর্তী তড়িচ্চালক শক্তি এবং পরিবর্তী প্রবাহের

অর্ধ চক্রের জন্য গড় মান $= \frac{2}{\pi} \times$ শীর্ষ মান

$= \frac{2}{\pi} \times (\sqrt{2} \times$ গড় বর্গের বর্গমূল মান)

$= \frac{2 \times \sqrt{2}}{\pi} \times$ গড় বর্গের বর্গমূল মান

$= \frac{2 \times \sqrt{2}}{\pi} \times$ আপাত মান।

$\therefore$ আপাত মান $= \frac{\pi}{2 \times \sqrt{2}} \times$ গড় মান

$= \frac{1}{\sqrt{2}} \times$ শীর্ষ মান ... ... (5.29)

দিক পরিবর্তী প্রবাহের ক্ষেত্রে, গড় বর্গের বর্গমূল মান,

$I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \times$ শীর্ষ মান

$\therefore$ শীর্ষ মান $= \sqrt{2} \times$ গড় বর্গের বর্গমূল মান $= \sqrt{2} \times I_{rms}$

সমীকরণ (5.29) হতে সহজেই বুঝতে পারা যায়,

সম প্রবাহ (D. C.) অপেক্ষা পরিবর্তী প্রবাহ (A. C.) বেশি বিপজ্জনক।

প্রশ্ন : AC 220V, DC 220V অপেক্ষা বেশি বিপজ্জনক কেন ?

আপাত তড়িচ্চালক শক্তি $= \frac{1}{\sqrt{2}} \times E_0 = 0.707 \times E_0$ এবং গড় তড়িচ্চালক শক্তি $= \frac{2}{\pi} \times E_0 = 0.637 \times E_0$

∴ আপাত তড়িচ্চালক শক্তি > গড় তড়িচ্চালক শক্তি।

220 V AC বলতে বুঝায় তার কার্যকরী মান 220 V হলেও তার শীর্ষ মান $= 220 \times \sqrt{2} = 311$ V। অতএব কোনো ব্যক্তি যদি 220 V DC শক্ পায় তবে এটি 220 V দ্বারাই হবে। কিন্তু তিনি যদি 220 V AC শক্ পান, তবে সর্বাধিক শক্ পাবে 311 V যা 220 V-এর শক্ অপেক্ষা অনেক বেশি হবে। সুতরাং নিঃসন্দেহে 311 V দ্বারা শক্ 220 V দ্বারা শক্ অপেক্ষা অনেক বেশি বিপজ্জনক।

গাণিতিক উদাহরণ ৫.৫

১। একটি পরিবর্তী বর্তনীর প্রবাহ মাত্রার শীর্ষমান 20A এবং এর কম্পাঙ্ক 50 Hz। এর গড় বর্গের বর্গমূল মান নির্ণয় কর। শূন্য থেকে শীর্ষ মানে পৌঁছাতে কত সময় লাগবে ? [ব. বো. ২০০৭; CUET Admission Test, 2008-09; SUST Admission Test, 2016-17]

মনে করি, গড় বর্গের বর্গমূল মান $= i_{rms}$

∴ আমরা পাই,

$$i_{rms} = \frac{i_0}{\sqrt{2}} \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad (i)$$

এখানে,
$i_0 = 20A$
$f = 50$ Hz

এখন সমীকরণ (i) হতে পাই,

$$i_{rms} = \frac{20}{\sqrt{2}} = 14.14 \text{ A}$$

পর্যায়কাল, $T = \frac{1}{f}$

এবং সর্বোচ্চ মানে পৌঁছার সময়,

$$t = \frac{T}{4} = \frac{1}{4f}$$

$$\therefore t = \frac{1}{4 \times 50} = \frac{1}{200} \text{ s} = 5 \times 10^{-3} \text{s}$$

২। একটি এ. সি. উৎসের বিস্তার 160 V এবং কম্পাঙ্ক 60 Hz। এর উৎসের সাথে 20 Ω রোধ যুক্ত করা হলে, কার্যকর ভোল্টেজ, কার্যকর প্রবাহমাত্রা এবং উত্তাপজনিত শক্তিক্ষয় নির্ণয় কর। [ব. বো. ২০০৯, ২০০১]

আমরা জানি,

কার্যকর ভোল্টেজ = ভোল্টেজের গড় বর্গের বর্গমূল $= E_{rms}$

এখানে,
$E_0 = 160$ Volt
$R = 20\ \Omega$

এখন, $E_{rms} = \frac{E_0}{\sqrt{2}}$

$$\therefore E_{rms} = \frac{160}{\sqrt{2}} = 113.47 \text{ Volt}$$

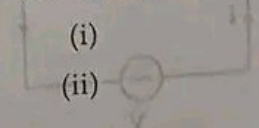
এখন, $I_0 = \frac{E_0}{R}$ ∴ $I_0 = \frac{160}{20} = 8$ Amp

কার্যকর প্রবাহমাত্রা, $I_{rms} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = \frac{8}{\sqrt{2}} = 5.67$ Amp

উত্তাপজনিত শক্তিক্ষয়ের হার $= I_{rms}^2 R = (5.67)^2 \times 20 = 643 \text{ Js}^{-1}$

৩। একটি দিক পরিবর্তী তড়িৎ প্রবাহের সমীকরণ $i = 50 \sin 628\, t$ হলে তড়িৎ প্রবাহের (a) শীর্ষ মান; (b) কম্পাঙ্ক এবং (c) মূল গড় বর্গের মান নির্ণয় কর। [রা. বো. ২০০৯; চ. বো. ২০০৫]

প্রদত্ত সমীকরণ, $i = 50 \sin 628\, t \quad \ldots \quad \ldots \quad (i)$



তড়িৎ প্রবাহের সাধারণ সমীকরণ, $i = i_0 \sin \omega t \quad \ldots \quad \ldots \quad (ii)$

সমীকরণ (i) ও (ii)-এর তুলনা করে পাই,

(a) তড়িৎ প্রবাহের শীর্ষ মান, $i_0 = 50$ Amp

আমরা জানি, একটি সম্পূর্ণ পর্যায় (complete cycle)-এর জন্য $\sin^2 \omega t$ এর গড় মান $= \frac{1}{2}$। সুতরাং, বর্তনীর গড় ক্ষমতা, $\overline{P} = \frac{1}{2} V_0 I_0 = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \times \frac{I_0}{\sqrt{2}}$

$$\overline{P} = V_{rms} I_{rms} = (I_{rms} R) \cdot I_{rms} = I^2_{rms} R \quad \ldots \ldots \ldots (5.32)$$

বর্তনীতে দিক পরিবর্তী ভোল্টেজের স্থলে ডি.সি. ভোল্টেজ প্রযুক্ত হলে [চিত্র ৫.২০(খ)] ক্ষমতা,

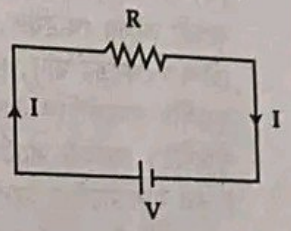
$$P = VI = IR.I = I^2R \quad \ldots \ldots \ldots (5.33)$$

সমীকরণ (5.32) ও (5.33) থেকে দেখা যায় যে ডিসি প্রবাহের ক্ষেত্রে I-এর যে ভূমিকা দিক পরিবর্তী প্রবাহের ক্ষেত্রে I_{rms} এর একই ভূমিকা।

প্রকৃতপক্ষে দিক পরিবর্তী বর্তনীতে আমরা যে ভোল্টেজ এবং প্রবাহ পরিমাপ করি তা V_{rms} এবং I_{rms}।

V_{rms} এবং I_{rms} কে যথাক্রমে কার্যকর ভোল্টেজ এবং কার্যকর প্রবাহ বলে। এসি ভোল্টমিটার বা অ্যামিটারে যে পাঠ দেয় তা V বা I এর *rms* মান নির্দেশ করে।

চিত্র ৫.২০(খ)



আকৃতি গুণাঙ্ক (Form factor) : দিক পরিবর্তী তড়িচ্চালক শক্তি বা প্রবাহমাত্রার গড় বর্গের বর্গমূল (*rms*) মান এবং গড় মানের অনুপাতকে আকৃতি গুণাঙ্ক বলে।

$$\text{অতএব, আকৃতি গুণাঙ্ক} = \frac{\text{গড় বর্গের বর্গমূল মান বা আপাত মান}}{\text{গড় মান}}$$

$$= \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} \times \text{শীর্ষমান}}{\frac{2}{\pi} \times \text{শীর্ষমান}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{\pi}{2} = 1{\cdot}11$$

আকৃতি গুণাঙ্ক পরিবর্তী প্রবাহ বা তড়িচ্চালক শক্তির তরঙ্গ আকার নির্দেশ করে।

এখানে উল্লেখ্য যে, আকৃতি গুণাঙ্কের এই 1·11 মান শুধুমাত্র সাইনধর্মী ভোল্টেজ বা প্রবাহের ক্ষেত্রেই প্রযোজ্য। ভিন্ন ভিন্ন তরঙ্গরূপের ক্ষেত্রে আকৃতি গুণাঙ্কের মান ভিন্ন হয়।

প্রয়োজনীয় গাণিতিক সূত্রাবলি

$$E = -N\frac{d\varphi}{dt} \quad \ldots \ldots \ldots (1)$$

$$\varphi = LI \quad \ldots \ldots \ldots (2)$$

$$E = -L\frac{dI}{dt}, \quad E = -M\frac{dI}{dt} \quad \ldots \ldots \ldots (3)$$

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad \ldots \ldots \ldots (4)$$

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad \ldots \ldots \ldots (5)$$

$$E_{rms} = 0{\cdot}707\ E_0 \quad \ldots \ldots \ldots (6)$$

$$I_{rms} = 0{\cdot}707\ I_0 \quad \ldots \ldots \ldots (7)$$

$$P = I^2_{rms} R \quad \ldots \ldots \ldots (8)$$