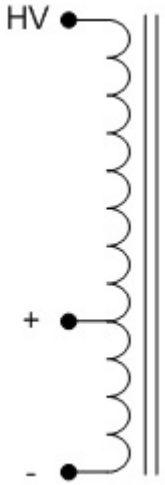
II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Ignition Coil

Ignition Coil adalah alat yang digunakan untuk menghasilkan tegangan tinggi diperlukan untuk menciptakan percikan yang memicu bahan bakar dalam mesin pembakaran internal, dan sebagian besar kumparan pengapian ini di gunakan pada kendaraan bermotor, mobil, truk, traktor rumput.

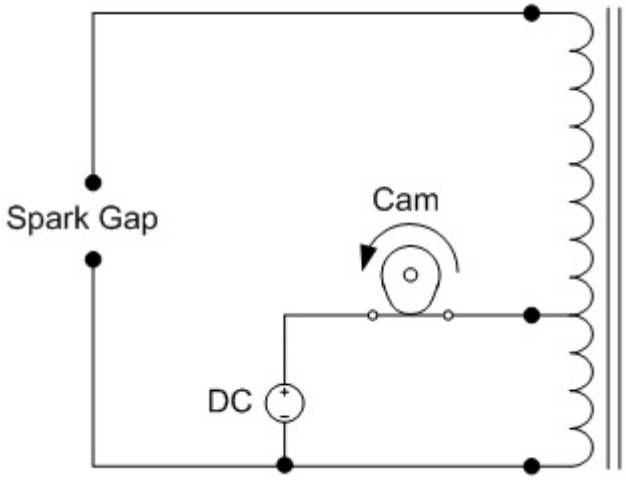
Gambar 1. Ignition Coil (Kumparan Pengapian)

Ignition Coil istilah khusus mengacu pada tiga perangkat terminal yang terdiri dari dua kumparan kawat dengan koneksi umum yang luka pada inti magnetik.



Gambar 2. Skematik Ignition Coil

Ignition coil ini sangat berguna untuk menciptakan tegangan yang sangat tinggi dan busur yang sangat panjang. Sayangnya banyak sekali informasi tidak tepat mengenai tentang ignition coil tersebut. Mudah-mudakan tulisan ini memberikan informasi yang cukup untuk memberikan informasi yang cukup untuk memahami persis bagaimana koil penyala bekerja serta beberapa ide dan proyek untuk mendapatkan anda memulai aplikasi otomotif sirkuit koil pengapian umum terdiri suplai tegangan secara seri dengan saklar mekanik diseluruh terminal dengan saklar di buka dan di tutup oleh cam.



Gambar 3. Sirkuit Aplikasi Otomotif, Saklar tertutup.

Ketika cam menutup saklar, arus mengalir melalui kumparan tegangan rendah berkelok-kelok yang memiliki relatif sedikit berubah, dan kemudian perlahan-lahan meningkat fluks magnetik dalam inti (menyimpan energi). Ketika cam membuka saklar, arus cepat menurun, menyebabkan fluks magnetik dalam inti mengurangi dengan cepat juga. Karena tegangan tinggi berliku (yang memiliki banyak berubah dari tegangan rendah berkelok-kelok) adalah luka pada inti yang sama, ia melihat penurunan yang cepat sama dalam fluks magnetik. Anda mungkin ingat dari sebelumnya bahwa tegangan yang berliku diberikan oleh.

$$V_{HV} = N_{HV} \frac{d\Phi}{dt}$$

Gambar 4. Rumus Tegangan Tinggi dengan perubahan Fluks.

Dimana V_{HV} adalah tegangan pada kumparan tegangan tinggi, N_{HV} adalah jumlah lilitan dalam tegangan tinggi coil dan Φ adalah fluks magentik dalam inti. Karena

tegangan kumparan berkaitan dengan tingkat perubahan fluks magnetik, dan fluks magnetik berubah dengan cepat, tegangan besar dibuat di terminal HV.

Mari kita lihat proses ini secara lebih rinci. Pertama, Pertimbangkan saat dimana saklar menutup. Ini adil untuk menganggap bahwa pada saat itu inti magnetik akan benar-benar mengalami kerusakan magnetik dan fluks akan menjadi nol. Menutup switch akan menerapkan tegangan ke koil yang akan menyebabkan fluks magnetik untuk membangun dari waktu ke waktu.

$$\Phi = \frac{V_{LV} t}{N_{LV}}, \frac{d\Phi}{dt} = \frac{V_{LV}}{N_{LV}}$$

Gambar 5. Magnetik Fluks akibat terjadinya Tegangan rendah.

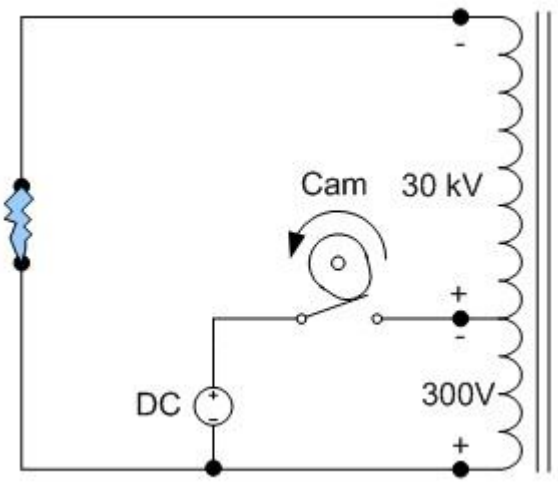
Pada beberapa titik waktu cam akan membuka tombol lagi, dan ini adalah dimana hal-hal mendapatkan sedikit lebih menarik. Pada saat ini ada beberapa jumlah fluks magnetik yang tersimpan dalam inti magnetik yang mewakili beberapa jumlah fluks magnetik yang tersimpan dalam inti magnetik yang mewakili beberapa energi yang tersimpan, dan karena itu tidak dapat hanya dissappear. Sebaliknya, harus ada beberapa makanisme untuk menghamburkan energi dan mengurangi fluks kembali ke nol. Dalam rangka untuk mencapai hal ini, tegangan negatif besar muncul di seluruh tegangan rendah berkelok-kelok, rumus gambar 5 menunjukan fluks magnetik menurun dari waktu ke waktu. Kunci untuk operasi coil pengapian pada kenyataan bahwa tegangan negatif besar yang muncul pada tegangan rendah berliku hasil dalam penurunan yang sangat cepat berubah.

Karena tegangan tinggi berkelok-kelok adalah pada inti yang sama, maka akan mengalami penurunan yang cepat sama dalam fluks magnetik. Pada rumus di gambar 5 yang memberikan perubahan fluks dari waktu ke waktu, dalam rumus gambar 4 yang memberikan tegangan dari tegangan tinggi berliku sebagai fungsi dari fluks, akan memberikan tegangan melintasi tegangan tinggi berliku karena tegangan diterapkan pada tegangan rendah berliku. Substansi ini memberikan hasil sebagai berikut.

$$V_{HV} = N_{HV} \times \frac{V_{LV}}{N_{LV}} = \frac{N_{HV}}{N_{LV}} \times V_{LV}$$

Gambar 6. Rumus Tegangan Transformator.

Perhatikan bahwa persamaan ini menjelaskan tindakan transformator, dimana tegangan yang muncul pada tegangan tinggi berliku sama dengan tegangan rendah berliku dikalikan dengan rasio belitan dari dua gulungan. Ini memiliki efek mengalikan tegangan besar yang muncul pada tegangan rendah yang muncul pada tegangan rendah berliku dalam rangka untuk men-reset inti dengan rasio belitan dari dua gulungan. Dengan rasio putaran 100:1 dan tegangan reset pada tegangan rendah berkelok-kelok dari 300V, tegangan 30kV akan muncul di tegangan tinggi berliku.

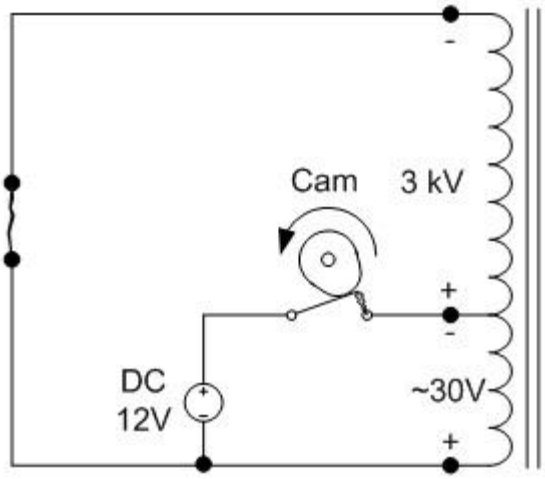


Gambar 7. Sirkuit Aplikasi Automotif, Saklar terbuka.

Saya belum melihat penjelasan yang baik di tempat lain seperti apa faktor mengontrol tegangan rendah berliku tegangan reset. Aku membuang 300V hanya untuk menempatkan beberapa nomor pada masalah, tapi bagaimana tegangan yang benar-benar ditentukan? Jawaban singkatnya adalah bahwa ketika tegangan rendah berliku terputus tegangan di atasnya. Dan akibatnya tegangan tinggi berkelok-kelok, akan meningkat sampai energi menemukan tempat untuk pergi. Keterangan dari tegangan pada sirkuit yang terhubung ke koil. Berikut adalah beberapa contoh dari beberapa siruit yang lebih umum.

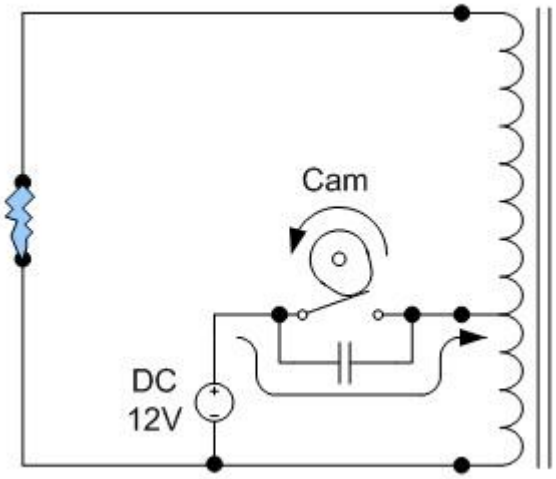
Mari kita mulai dengan rangkaian yang ditunjukan pada gambar 6 dan gambar 7. Ada kelalaian penting yang membedakan sirkuit ini dengan yang ditemukan dalam mobil yang secara drastis mengurangi kinerja rangkaian seperti yang ditunjukkan. Pada saat ketika saklar mulai membuka, maka potensi peningkatan tegangan terjadi di switch, yang cepat rusak untuk membentuk busur pada tegangan yang relatif rendah. Tegangan busur kemudian menjadi gaya menyebabkan fluks magnetik jatuh, dan pada tingkat yang jauh lebih rendah

daripada yang kita inginkan. Tentu saja hal ini menyebabkan tegangan output jauh lebih rendah juga, dan busur yang lemah terjadi.



Gambar 8. Rendah kinerja dari Ignition coil karena beralih arcing.

Sirkuit yang sebenarnya digunakan dalam sistem pangapian otomotif termasuk kapasitor di switch untuk mencegah lengkung dan meningkatkan kinerja. Sementara saklar ditutup ada sangat sedikit tegangan diatasnya (beberapa milivolts) yang menyebabkan kapasitor untuk sepenuhnya debit. Pada saat ketika saklar mulai membuka kekuatan kapasitor tegangan di atasnya untuk tetap nol (atau sangat mendekati nol) volt, mencegah busur dari pembentukan. Kapasitor menyediakan fungsi lain yang penting dalam rangkaian ini dengan menyediakan fungsi lain yang penting dalam rangkaian ini dengan menyediakan jalan bagi tegangan rendah berliku arus mengalir ketika saklar terbuka.



Gambar 9. Peningkatan kinerja dengan capasitor Across beralih

Jadi bagaimana tepatnya, selain mencegah beralih dari busur, apakah kapasitor meningkatkan tegangan pada tegangan rendah berkelok-kelok? Ketika saklar membuka semua arus yang mengalir pada tegangan rendah berkelok-kelok mulai mengalir melalui kapasitor, sampai semua energi yang tersimpan dalam induktor di transfer ke kapasitor. Persamaan untuk energi yang tersimpan dalam induktor ditransfer kapasitor. Persamaan untuk energi yang tersimpan dalam setiap komponen di berikan di bawah ini.

$$E = \frac{1}{2}CV^2 \qquad E = \frac{1}{2}LI^2$$

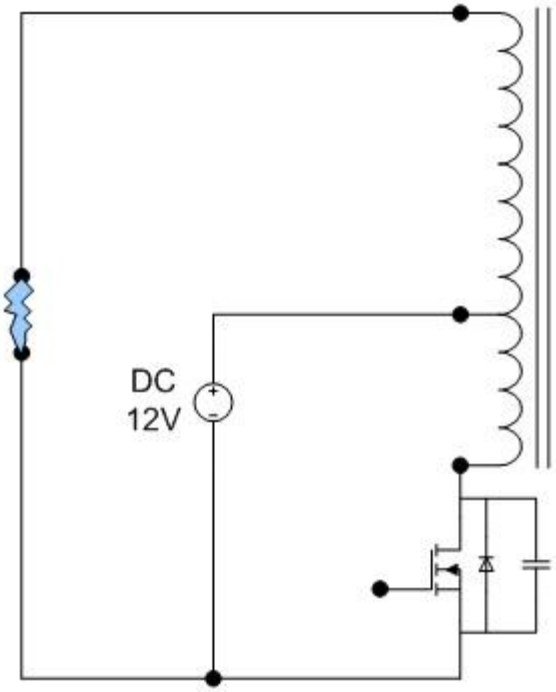
Gambar 10. Rumus penyimpanan energi pada Capasitor dan Induktor.

Persamaan ini dapat digunakan untuk memperkirakan tegangan maksimum dicapai di tegangan rendah berliku. Asumsikan bahwa tegangan rendah berliku induktansi adalah 5 mH, arus puncak pada tegangan rendah berkelok-kelok adalah

5A. Induktor tidak jenuh, dan kami ingin 300 V di seluruh tegangan rendah berliku. Menggunakan persamaan 4B kita dapat menghitung bahwa 5mH membawa 5A toko 62,5 mJ energi. Jika energi ini benar-benar di transfer ke kapasitor, kita dapat menggunakan persamaan 4A untuk menghitung bahwa kita perlu kapasitansi dari 1,39 UF mencapai 300 V. Tegangan yang sebenarnya akan terbatas jika salah satu tegangan rendah atau gulungan tegangan tinggi yang mampu menciptakan busur sebelum kapasitor terisi penuh.

Yang sebagian besar mencakup bagaimana sebuah gulungan starter beroperasi di dalam kendaraan, tetapi kemungkinan bahwa sebagian besar aplikasi non-kendaraan akan lebih tidak menyertakan cam dan saklar mekanik. Fungsi switch dapat dengan mudah diganti dengan transistor atau MOSFET, tapi beberapa perawatan yang diperlukan dalam merancang rangkaian agar tidak merusak salah satu perangkat semikonduktor yang relatif halus. Saya telah melihat beberapa tempat di internet di mana penulis menyatakan switch semikonduktor tidak dapat diandalkan untuk aplikasi koil pengapian, tapi ini tidak begitu. Tidak ada alasan mengapa saklar semikonduktor tidak dapat digunakan andal dalam aplikasi ini, dan itu lebih mungkin bahwa sirkuit mereka dirancang dengan buruk.

Pertama, amati apa yang terjadi ketika saklar mekanik hanya diganti dengan MOSFET. Saklar tersebut akan dipindahkan ke sisi rendah dari kumparan, tetapi ini tidak mengubah pengoperasian sirkuit, itu hanya membuatnya lebih mudah untuk mendorong gerbang MOSFET.



Gambar 11. Ignition coil menggunakan pengendali MOSFET

Metode ini sangat sederhana saklar digantikan oleh MOSFET, tapi bagaimana itu berbeda daripada menggunakan saklar mekanik? Ada dua perbedaan utama. Pertama, kapasitansi di MOSFET kecil dibandingkan dengan kapasitor biasanya digunakan dengan switch mekanis. A 400 V 10 A MOSFET mungkin memiliki kapasitansi pada urutan 100 pF, atau sekitar 10.000 kali lebih kecil dari kapasitor dalam contoh otomotif sebelumnya. Implikasi praktis dari hal ini adalah bahwa tegangan MOSFET akan meningkat jauh lebih cepat, dan untuk tegangan jauh lebih tinggi daripada dalam aplikasi otomotif. Menggunakan contoh dari 5 mH dan 5 A, tegangan MOSFET secara teoritis akan meningkat menjadi 1,25 GV (1.250 Juta Volt!) Sekarang, jelas orang-orang semacam tegangan keterlaluan akan pernah tercapai. Sesuatu yang lain dalam rangkaian akan memberi jalan baik sebelum tegangan mencapai yang tinggi (saya sedang melihat Anda, MOSFET.)

Perbedaan lain, yang tampaknya cukup jelas adalah bahwa tidak ada lagi kontak mekanis membuka. Dalam sistem mekanis dengan tegangan terkendali build-up busur akan membentuk seluruh saklar dan menghilangkan semua energi itu. Tidak ada mekanisme keamanan seperti dengan MOSFET.

Jadi apa yang akan terjadi di sirkuit MOSFET? ada dua kemungkinan. Kasus terbaik adaalah bahwa busur akan melompat antara dua titik dalam rangkaian yang berdekatan sebelum tegangan mampu membangun ke tingkat dimana apapun di sirkuit rusak. Lebih mungkin, dan lebih merusak, akan bahwa tegangan MOSFET akan membangun hingga gangguan tegangan dan MOSFET akan mulai melakukan dalam sebuah acara yang disebut ‘avalanche”. Sebuah longsoran yang cukup besar akan menyebabkan kerusakan yang signifikan pada MOSFET, atau menghancurkannya sama sekali dalam satu tembakan. Meskipun potensi kerusakan yang disebabkan, banyak MOSFET dapat menahan beberapa tingkat longsoran berulang.

Parameter kunci untuk merancang sebuah sirkuit yang dapat menahan longsor biasanya tercantum pada datasheet MOSFET sebagai "Single Pulse Longsor Energi" dan "berulang Avalanche Energy" (jika MOSFET avalanche dinilai sama sekali.) Parameter ini menentukan energi maksimum MOSFET dengan aman dapat menyerap tanpa kerusakan. Datasheet mungkin daftar pulsa energi longsoran tunggal untuk beralih tertentu menjadi 500 mJ. Dalam hal ini, persamaan 4B akan digunakan untuk menghitung jumlah energi yang tersimpan dalam induktansi yang akan dimatikan dan dibandingkan dengan nilai datasheet. Jika perangkat hipotetis ini digunakan untuk mengganti 5 mH, 5 A induktor dalam contoh sebelumnya (yang kita dihitung menjadi 62,5 mJ) kita harapkan saklar

untuk bertahan hidup longsoran tunggal. Perangkat yang sama ini mungkin memiliki energi longsoran berulang dari 15 mJ, dalam hal ini tidak akan ada garauntee bahwa perangkat akan bertahan atau beroperasi dengan benar setelah beberapa longsoran. Dalam kedua kasus, MOSFET akan menyerap energi dari longsoran, dan mungkin memanas substansial. Perawatan harus diambil untuk memastikan bahwa energi longsoran tidak melebihi spesifikasi datasheet DAN bahwa perangkat akan tetap berada dalam spesifikasi suhu datasheet.

Tentu saja, yang memungkinkan MOSFET untuk beroperasi dalam modus avalanche mungkin bukan pilihan terbaik, dan ada cara lain untuk membatasi tegangan itu pengalaman. Metode yang paling jelas adalah untuk menambahkan kapasitansi eksternal di MOSFET, seperti dengan saklar mekanik. Kapasitansi dapat berukuran, seperti sebelumnya, untuk memastikan tegangan tertentu atau mencegah rangkaian dari melebihi tegangan tertentu. Solusi yang lebih kuat adalah dengan menambahkan sebuah kapasitor secara seri dengan resistor (biasanya disebut "snubber.") Ini memungkinkan energi yang diserap oleh kapasitor yang akan dihamburkan dalam resistor eksternal, daripada MOSFET itu sendiri. Hal ini juga mencegah lonjakan arus yang besar dari kapasitor melalui MOSFET ketika pertama kali menyalakan. Ada jenis lain dari sirkuit snubber juga beberapa diantaranya berbagai kombinasi resistor, kapasitor dan dioda.

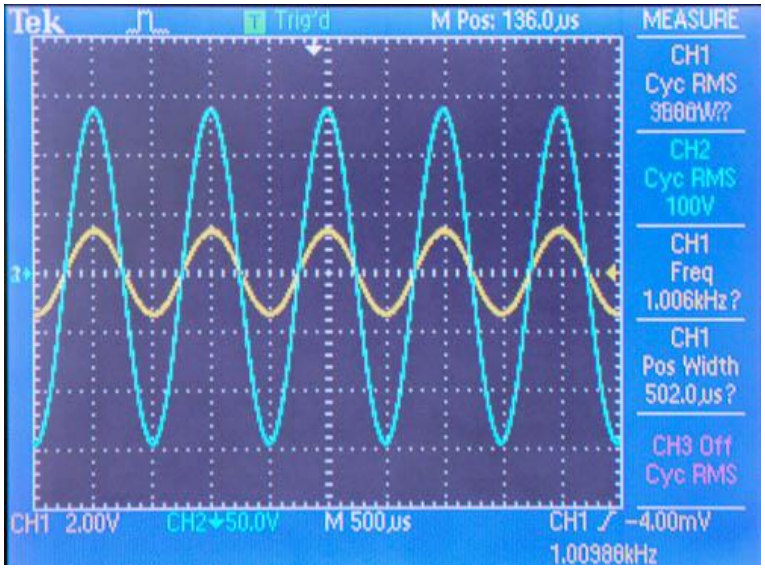
Mereka adalah dasar-dasar pengapian koil yang saya ingin membahas. Berikut adalah beberapa halaman tambahan informasi lebih rinci pada beberapa mata pelajaran terkait coil pengapian.

B. Pengukuran Ignition Coil dan Karakteristiknya.

Setiap desain yang melibatkan kumparan pengapian lebih canggih dari yang sangat sederhana akan membutuhkan beberapa pengetahuan rinci tentang karakteristik dari koil pengapian yang akan digunakan dalam desain. Lembar data rinci dengan karakterisasi menyeluruh dan parameter kunci tampaknya tidak akan tersedia, tapi banyak dari nilai-nilai ini dapat diperoleh dengan peralatan yang relatif sederhana dan teknik. Beberapa desain mungkin memerlukan lebih detail dari yang lain, sehingga spesifikasi yang paling dasar ditentukan terlebih dahulu, dan model yang semakin rinci dikembangkan.

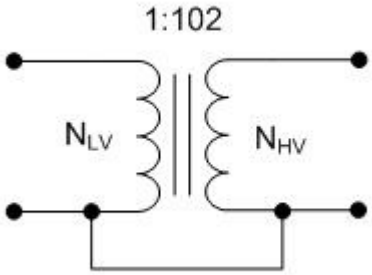
Struktur koil pengapian sangat mirip dengan sebuah transformator standar, dan sebagian besar pemodelan dan pengukuran teknik berlaku untuk keduanya. Dalam kedua kasus, parameter yang paling dasar adalah rasio belitan dari kumparan. Ada berbagai cukup khas untuk rasio belitan pengapian koil, umumnya antara 50:1 sampai 200:1 mungkin, dengan 100:1 mungkin yang paling umum. Pengukuran yang menunjukkan rasio belitan signifikan di luar kisaran ini mungkin menunjukkan kesalahan dalam pengukuran atau coil rusak. Metode paling sederhana untuk mengukur rasio belitan adalah untuk menerapkan tegangan AC ke salah satu coil, dan membandingkan besarnya tegangan pada kumparan lainnya. Perhatian utama dengan membuat pengukuran ini adalah untuk berhati-hati dari besarnya sinyal AC diterapkan. Menerapkan terlalu besar sinyal mungkin memiliki beberapa efek. Pertama, menerapkan terlalu besar produk volt-detik akan menghasilkan jenuh inti menghasilkan hasil yang salah. Juga, Jika arus magnetizing yang dihasilkan dari produk volt-detik besar menjadi terlalu besar dan impedansi sumber tegangan adalah tinggi (seperti dengan fungsi generator)

output mungkin jenuh mengakibatkan kliping dan pengukuran yang salah. Menjaga pertimbangan-pertimbangan dalam pikiran, pengukuran yang sebenarnya sangat sederhana.



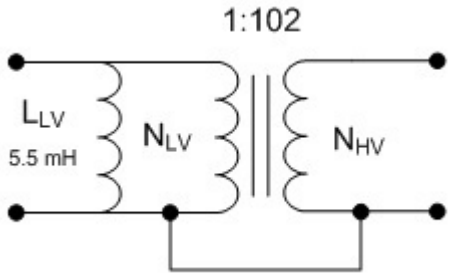
Gambar 12. Karakteristik sinyal ignition coil, dengan rasio pengukuran.

Menggunakan pengukuran ini, rasio belitan dihitung sebagai nilai RMS dari tegangan tinggi koil dibagi dengan nilai RMS dari kumparan tegangan rendah. Membagi 100 V dengan 983 hasil mV dalam rasio 101,7 berubah, sangat hampir 100:1. Model ini sejauh ini terlihat seperti.



Gambar 13. Model rasio kumparan Ignition Coil.

Selain aksi trafo yang ideal diukur di atas, mereka juga induktansi secara paralel dengan transformator yang ideal yang disebut induktansi magnetik. Biasanya, induktansi magnetik ditampilkan pada sisi primer transformator. Namun, hal itu dapat tercermin pada setiap berliku dengan kuadrat dari rasio belitan. Induktansi magnetik adalah induktansi yang diukur pada terminal transformator. Metode yang paling sederhana untuk mengukur induktansi magnetik adalah dengan menggunakan induktansi meter, tapi fungsi generator, resistor, dan osiloskop juga bisa digunakan. Aku mengukur induktansi magnetik kumparan saya dengan meter LCR dan mendapat 5,5 mH pada gulungan primer dan 57,2 H di sekunder. Perhatikan bahwa kedua pengukuran ini mengukur unsur yang sama di sirkuit, tidak ada dua elemen independen yang diukur. Sebagai bukti ini, membagi induktansi diukur sekunder dengan rasio belitan kuadrat, yaitu 57,2 H dibagi dengan 1022, menghasilkan hampir persis 5,5 mH.



Gambar 14. Model Ignition Coil, memasukan induktansi magnetik.

Pengukuran ini dapat digunakan untuk memeriksa pengukuran rasio belitan dibuat sebelumnya juga. Induktansi dari setiap gulungan diberikan oleh.

$$L = \frac{N^2}{\Re}$$

Gambar 15. Rumus Induktansi Ignition Coil

$$L = \frac{N^2}{\Re}, \Re = \frac{N^2}{L}$$

$$\Re = \frac{N_{LV}{}^2}{L_{LV}}, \Re = \frac{N_{HV}{}^2}{L_{HV}}, \frac{N_{LV}{}^2}{L_{LV}} = \frac{N_{HV}{}^2}{L_{HV}}, \frac{N_{LV}{}^2}{N_{HV}{}^2} = \frac{L_{LV}}{L_{HV}}, \left(\frac{N_{LV}}{N_{HV}}\right)^2 = \frac{L_{LV}}{L_{HV}}$$

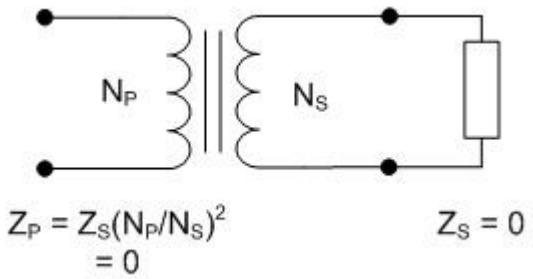
$$\frac{N_{LV}}{N_{HV}} = \sqrt{\frac{L_{LV}}{L_{HV}}}$$

Gambar 16. Persamaan yang telah di satukan.

Menggunakan nilai yang terukur sebelumnya, rasio belitan dihitung untuk 102:1 oleh gambar 16 juga, yang mendukung penghitungan awal.

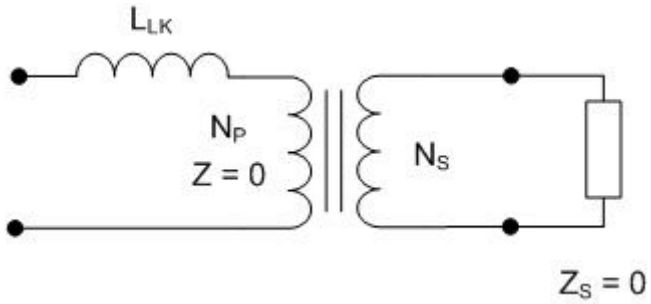
Penyempurnaan berikutnya dari model ini adalah untuk menambahkan induktansi kebocoran. Kebocoran induktansi merupakan fluks melalui satu kumparan yang tidak terkait dengan kumparan lain, dan dimodelkan sebagai induktansi seri dengan induktansi magnetizing. Lebih khusus lagi, kebocoran fluks adalah bagian dari induktansi magnetizing diukur yang tidak terkait dengan kumparan lainnya, sehingga kebocoran induktansi diukur dikurangi dari diri induktansi untuk mendapatkan estimasi yang lebih baik.

Pertimbangkan sebuah transformator ideal dengan korsleting sekunder. Dalam konfigurasi ini, impedansi primer dapat dihitung sebagai impedansi sekunder dikalikan dengan kuadrat rasio bergantian. Dengan korsleting sekunder (yaitu impedansi sekunder adalah nol) impedansi primer juga akan menjadi nol.



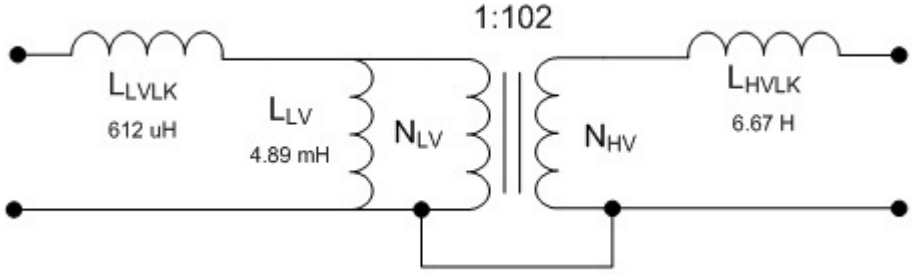
Gmbar 17. Skematik trafo dengan beban nol

Jika sekunder korsleting pada transformator praktis dan impedansi diukur pada primer hasilnya akan menunjukkan beberapa nilai terbatas induktansi hadir. Hal ini disebabkan induktansi kebocoran, yang tidak terkait dengan sekunder, dan karena itu tidak mewakili impedansi skala sekunder itu.



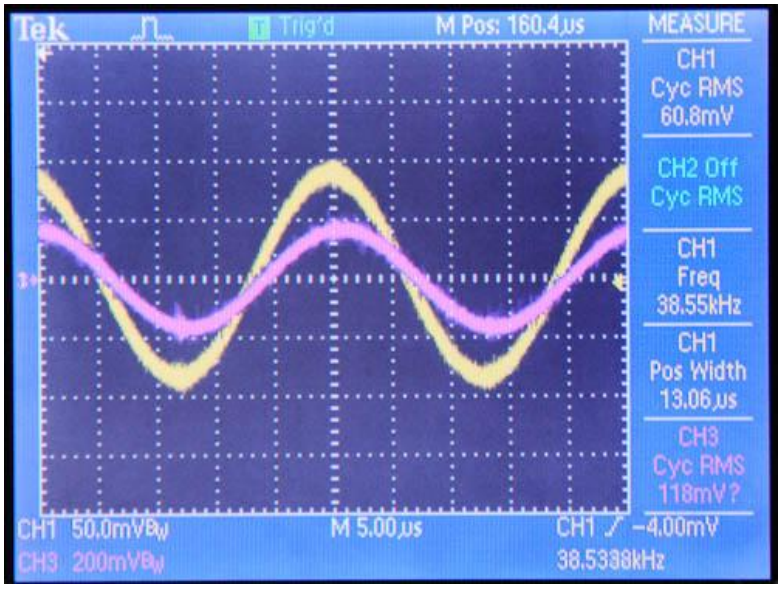
Gambar 18. Transformer dengan kebocoran Induktansi

Dengan menggunakan metode ini, kebocoran induktansi untuk rendah dan tinggi kumparan tegangan diukur menjadi 612 uh dan 6,76 H, masing-masing. Menambahkan induktansi kebocoran ini untuk hasil model masuk.



Gambar 19. Model ignition coil dengan kebocoran induktansi

Sejauh ini model hanya dipertimbangkan efek murni induktif. Namun, pada frekuensi yang lebih tinggi perilaku kapasitif menjadi dominan. Hal ini biasanya disebabkan oleh kapasitansi antara gulungan, tetapi kapasitansi ini tidak sepenuhnya menjelaskan perilaku yang diamati. Cukup, model disamakan yang digunakan untuk menggambarkan induktansi menjadi tidak memadai sebagai panjang gelombang menjadi lebih pendek dan panjang dibandingkan dengan kumparan itu sendiri. Pada titik tertentu, sebagai frekuensi meningkat, reaktansi induktif dan kapasitif membatalkan dan kumparan akan beresonansi. Titik ini disebut frekuensi resonansi diri. Model disamakan dapat dimodifikasi dengan penambahan kapasitor untuk memperbaiki perilakunya pada rentang terbatas frekuensi di atas frekuensi resonansi diri tanpa menggunakan model saluran transmisi. Menentukan frekuensi resonansi diri dibantu oleh fakta bahwa kumparan muncul benar-benar resistif pada frekuensi ini. Pada titik ini tegangan dan arus yang melalui kumparan akan di fase, memungkinkan frekuensi resonansi diri akan ditentukan oleh menyapu frekuensi dan mencatat titik di mana tegangan dan arus berada dalam fase.



Gambar 20. Karakteristik Resonansi Frekuensi ignition coil.

Di sini, frekuensi resonansi diri untuk kumparan saya bertekad untuk menjadi 38,55 kHz. Hubungan antara resonansi dan frekuensi untuk rangkaian LC paralel.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

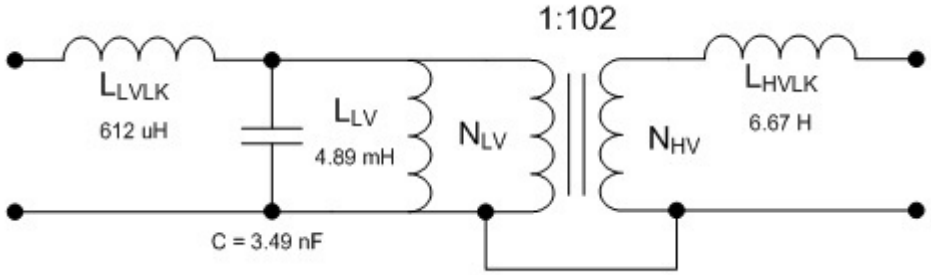
Gambar 21. Rumus LC.

Pemecahan persamaan ini untuk kapasitansi memberikan hasilnya.

$$C = \frac{\left(\frac{1}{\omega}\right)^2}{L}$$

Gambar 22. Menentukan Resonansi Kapasitansi

Menggunakan diri induktansi dari tegangan rendah berkelok-kelok dan frekuensi resonansi diri, kapasitansi resonansi dapat dihitung menjadi 3,49 nF. Model dengan kapasitansi ini ditunjukkan di bawah ini.



Gambar 23. Ignition Coil dengan Kapasitansi

Selain elemen induktif dan kapasitif sudah dibahas, gulungan tembaga juga memiliki beberapa perlawanan. Nilai-nilai ini dapat dengan mudah diukur dengan Ohm meter. Aku menentukan tegangan rendah dan kumparan tegangan tinggi resistensi menjadi 1,7 dan 8,7 kOhms masing-masing. Ini menggoda untuk menggunakan nilai-nilai secara langsung dalam model; Namun, nilai-nilai ini jarang akurat pada frekuensi tinggi. Ini agak kontra intuitif, karena resistensi umumnya tidak dianggap bergantung pada frekuensi. Dalam kasus resistensi pada frekuensi tinggi dua efek, yang disebut kulit dan efek kedekatan, dapat meningkatkan resistensi terhadap sinyal AC. Efek kulit menyebabkan arus ac meningkatkan frekuensi untuk menembus kurang dalam ke dalam konduktor dari permukaan. Hal ini mengurangi penampang melalui mana arus mengalir, dan akibatnya meningkatkan daya tahan. Kedalaman kulit, atau kedalaman efektif yang menembus arus adalah memberikan oleh persamaan.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_r\mu}}$$

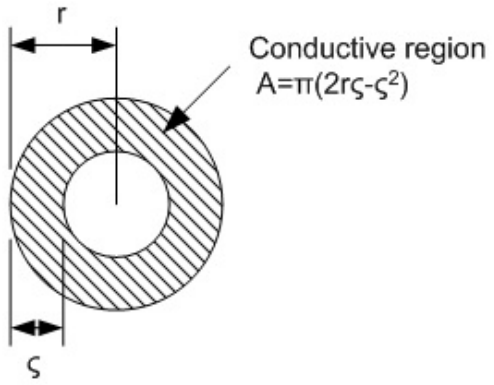
Gambar 24. Rumus kedalaman Kulit

mana kedalaman kulit, adalah resistivitas dari konduktor (1,68x10^{-8} Ohm.m untuk tembaga) dan permeabilitas ruang bebas (sama dengan $4\pi\times10^{-7}$ bahan non-magnetik sebagian besar) dan adalah permeabilitas relatif dari konduktor (sekitar 1 untuk sebagian besar konduktor non-ferrous) hambatan dari panjang kawat dengan panjang tertentu dan luas penampang dapat dihitung dengan.

$$R = \rho\frac{\ell}{A}$$

Gambar 25. Resistansi

di mana adalah panjang konduktor dan penampang konduktor. Jika diameter kawat kurang dari dua kali kedalaman kulit, maka daerah dapat dihitung dengan menggunakan. Jika tidak, penampang daerah konduktif akan lebih kecil dan harus dihitung seperti yang ditunjukkan pada Gambar 26.



Gambar 27. Luas konduksi untuk Silinder Konduktor.

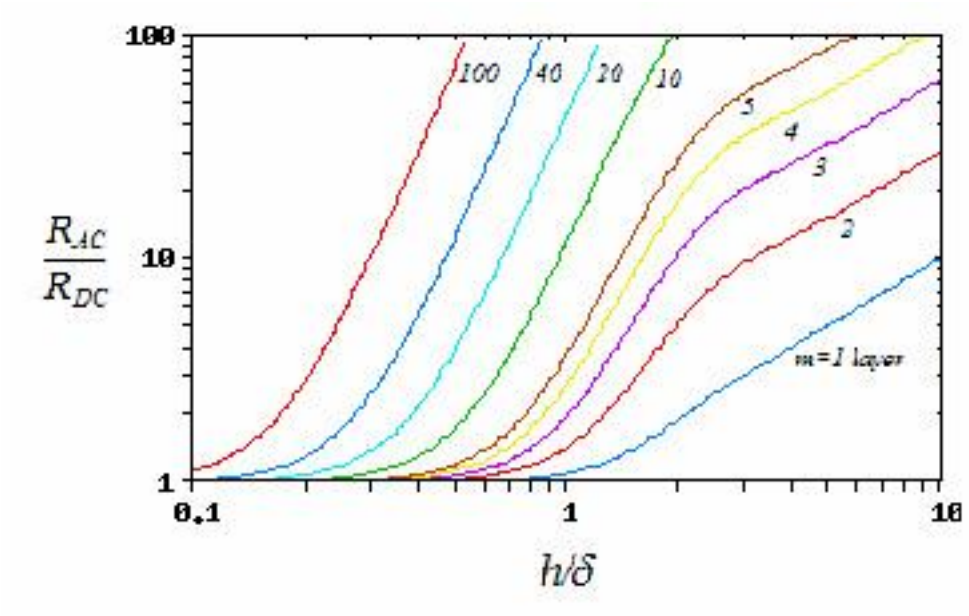
Oleh karena itu, perlawanan dari panjang kawat di mana diameter lebih kecil dari kedalaman kulit diberikan pada rumus di bawah ini.

$$R_{AC} = \rho \frac{\ell}{\pi\left[2r\sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_r\mu}} - \frac{2\rho}{\omega\mu_r\mu}\right]}$$

Gambar 28. Rumus Resistansi AC dari kawat dengan efek kulit

Efek kedekatan terjadi ketika berkelok-kelok lebih dari satu lapisan tebal, dan merupakan hasil dari fluks magnet yang berubah dari lapisan sebelumnya membatalkan arus pada interior saat ini berkelok-kelok dan meningkatkan arus di bagian luar berliku. Efeknya diperparah dengan setiap lapisan tambahan dalam kumparan, dan dapat sangat meningkatkan ketahanan AC efektif.

Bentuk yang tepat untuk efek kedekatan berada di luar cakupan diskusi ini, sehingga efek gabungan dari kulit dan efek kedekatan digabungkan untuk menunjukkan efek kumulatif mereka pada perlawanan AC.

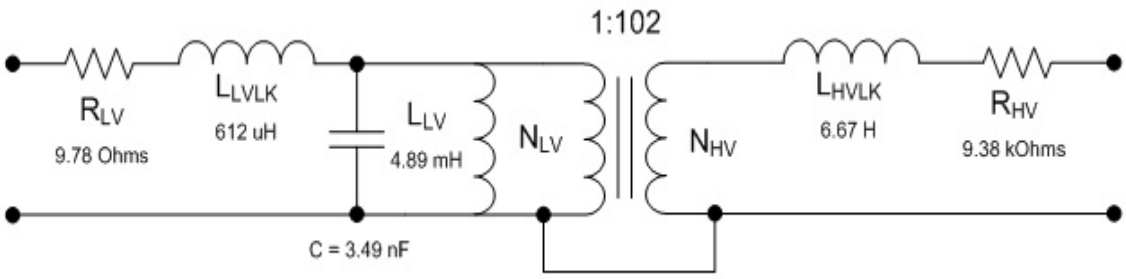


Gambar 29. Dowell Plot

Grafik ini, yang dikenal sebagai plot Dowell, dapat digunakan untuk menghitung faktor dimana resistensi DC harus dikalikan untuk menentukan perlawanan AC. Sumbu X adalah ketinggian konduktor dibagi dengan kedalaman kulit pada frekuensi yang menarik, dan diikuti secara vertikal sampai memotong kurva untuk jumlah lapisan dalam kumparan. Posisi titik ini ini kemudian dicatat pada sumbu vertikal, dan multiplier resistance dibaca off. Sebagai contoh, sebuah kumparan yang terbuat dari konduktor dengan rasio tinggi untuk kedalaman kulit tiga dan dua lapisan gulungan memiliki resistansi AC sekitar 12 kali lebih tinggi Thant resistansi DC dari kawat. Perlu dicatat bahwa kurva ini diturunkan untuk bentuk gelombang sinusoidal pada frekuensi tertentu. Switching bentuk gelombang

mengandung frekuensi pada harmonik fundamental dan lebih tinggi, jadi tergantung pada gelombang resistensi yang sebenarnya mungkin mungkin 1,2-2 kali lebih tinggi daripada yang ditunjukkan oleh plot Dowell.

Jika Anda kebetulan tahu secara spesifik konstruksi coil pengapian Anda, Anda dapat memperkirakan perlawanan AC menggunakan metode ini. Kemungkinan besar Anda tidak akan memiliki akses ke informasi bahwa kecuali jika Anda membongkar dan menghancurkan coil, yang kemungkinan besar tidak perlu. Hambatan AC untuk frekuensi switching yang diberikan dapat ditentukan dengan pengukuran sederhana dengan cukup kesetiaan untuk model ini. Dengan asumsi frekuensi switching dari 100 Hz, tegangan rendah dan tegangan tinggi berliku resistensi diukur sebagai 9,78 ohm dan 9,38 kΩ masing-masing (dibandingkan dengan 1,7 Ω dan 8,7 kΩ di DC). Model, termasuk resistensi berkelok-kelok pada 100 Hz ditunjukkan pada Gambar 30.



Gambar 30. Model Ignition Coil dengan memasukan resistansi coil.