

Analisis Performa Interior Permanent Magnet Synchronous Generator 1 kW 18 Slot 16 Pole Menggunakan Finite Element Method

Yongki Joyo Saputro¹, **Yulisman**, **Mahyessie Kamil**

Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat

Bukittinggi, Indonesia

Abstrak. *Interior Permanent Magnet Synchronous Generator (IPMSG)* merupakan salah satu teknologi yang banyak digunakan pada sistem pembangkit energi terbarukan berskala kecil seperti mikrohidro dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) mini, berkat efisiensi tinggi, kemampuan menghasilkan torsi besar pada kecepatan rendah, serta ketahanan mekanik dan demagnetisasi yang baik. Penelitian ini menganalisis pengaruh jenis material magnet permanen terhadap performa elektromagnetik IPMSG 1 kW, 18 slot 16 pole menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) pada perangkat lunak MagNet Infolytica. Tiga jenis magnet NdFeB yang diuji adalah NdFeB 48/11, NdFeB N50H, dan NdFeB N50M, dengan evaluasi pada parameter torsi, tegangan, arus, daya output, dan efisiensi. Hasil menunjukkan bahwa jenis material magnet permanen NdFeB N50M memberikan performa terbaik dengan daya output 1.007,73 W dan efisiensi 82,43 %, diikuti NdFeB N50H 936,39 W efisiensi 83,62 % dan NdFeB 48/11 687,26 W efisiensi 82,93 %. Tingkat optimasi terhadap NdFeB 48/11 sebesar 60,23 % pada N50H dan 74,96 % pada N50M.

Kata kunci: *Interior Permanent Magnet Synchronous Generator*; material magnet permanen; magnet NdFeB; MagNet Infolytica

1. Pendahuluan

Dalam beberapa dekade terakhir, pemanfaatan sumber energi terbarukan menjadi prioritas global guna mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Salah satu teknologi yang banyak dikembangkan dalam konteks energi bersih adalah generator sinkron magnet permanen, terutama tipe *Interior Permanent Magnet Synchronous Generator (IPMSG)*. Generator ini dikenal memiliki efisiensi tinggi, performa torsi yang baik pada kecepatan rendah, serta desain rotor yang aman karena magnetnya tertanam di dalam struktur rotor. Konfigurasi interior memberikan keunggulan dibandingkan tipe *surface-mounted*, seperti kemampuan menghasilkan gaya reluktansi tambahan, ketahanan terhadap demagnetisasi, dan stabilitas mekanik yang lebih baik (EL-Refaei, 2010). Oleh karena itu, IPMSG sangat sesuai untuk aplikasi pembangkit skala kecil seperti mikrohidro dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) mini.

Indonesia memiliki potensi besar untuk mengembangkan sistem pembangkit energi skala kecil berbasis energi terbarukan. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik tahun 2023, rata-rata daya listrik rumah tangga di Indonesia sekitar 1300 VA (PT PLN (Persero), 2023). Ini berarti pembangkit listrik dengan kapasitas di bawah 2 kW sudah cukup untuk memenuhi kebutuhan dasar rumah tangga. Di sisi lain, kecepatan angin rata-rata di berbagai wilayah Indonesia berkisar antara 3–5 m/s, yang termasuk kategori kecepatan rendah (Pambudi dkk., 2025). Maka dari itu, penggunaan IPMSG 16 *pole* dengan kecepatan nominal 375 rpm menjadi pilihan ideal untuk beroperasi secara efisien dalam kondisi angin rendah ataupun debit air kecil di sistem mikrohidro. Konfigurasi ini mampu menghasilkan torsi tinggi pada kecepatan rendah, yang sangat penting untuk sistem pembangkit energi terbarukan yang berkelanjutan.

Penelitian ini muncul dari pentingnya optimalisasi material magnet permanen dalam IPMSG. Jenis material seperti NdFeB, SmCo, Ferrite, dan komposit hibrid memiliki perbedaan signifikan dalam hal sifat magnetik, suhu operasi, ketahanan terhadap korosi, dan biaya. Pemilihan jenis magnet yang tepat sangat memengaruhi performa elektromagnetik seperti fluks, torsi, dan efisiensi, yang akhirnya berdampak pada sistem dan keandalannya. Oleh karena itu, kajian yang mendalam mengenai pengaruh variasi material magnet permanen terhadap performa IPMSG akan memberikan kontribusi penting dalam pengembangan pembangkit energi skala kecil yang efisien.

Berbagai studi telah membahas desain IPMSG dan strategi optimasi performa melalui variasi *slot*, bentuk rotor, dan *winding configuration* (EL-Refaie, 2010). Namun, masih terdapat kekurangan dalam literatur yang membandingkan secara sistematis berbagai material magnet permanen dalam aplikasi IPMSG berdaya rendah dan kecepatan rendah. Beberapa penelitian oleh (Wang dkk., 2019) dan (Niu, 2025) telah menyinggung optimasi magnet dan topologi rotor, tetapi fokusnya belum secara langsung diarahkan pada kebutuhan sistem pembangkit mikro seperti mikrohidro dan PLTB mini (Niu, 2025; Wang dkk., 2019). Maka dari itu, penelitian ini diperlukan untuk mengisi celah tersebut dan memperluas kontribusi ilmiah di bidang desain generator terapan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh jenis material magnet permanen terhadap performa elektromagnetik IPMSG 18 *slot* 16 *pole* dengan daya 1 kW, yang disimulasikan menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) dengan perangkat lunak MagNet Infolytica. Evaluasi akan difokuskan pada parameter torsi, tegangan, arus, daya output, dan efisiensi sistem untuk setiap variasi material magnet permanen. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan di masa mendatang dalam pemilihan material magnet permanen yang optimal untuk desain IPMSG dalam pembangkit listrik skala mikro.

2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini menganalisis pengaruh jenis material magnet permanen terhadap performa elektromagnetik IPMSG 1 kW 18 *slot* 16 *pole* menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) pada perangkat lunak MagNet Infolytica.

Software MagNet Infolytica ialah salah satu perangkat lunak berbasis *Finite Element Method* (FEM) (Andika & Aini, 2023). FEM merupakan teknik komputasi yang bekerja dengan membagi area perhitungan yang kompleks atau tak terbatas menjadi bagian-bagian kecil yang disebut mesh. Pada setiap elemen mesh tersebut, berbagai parameter seperti fluks, temperatur, tegangan, dan sebagainya dihitung secara terpisah. Perangkat lunak berbasis FEM digunakan untuk mengevaluasi kinerja dan karakteristik mesin elektromekanis, termasuk generator, motor, transformator, sistem pemanas induksi, dan lain-lain. Desain model berupa 2 dimensi atau 3 dimensi serta dapat mengkalkulasi parameter penting seperti torsi cogging, armature effect, dan nilai induktansi (Edwards, 2014; Miller, 1989; Sumawang & Pramono, 2022).

Fokus utama penelitian ini ialah mengetahui performa masing-masing material magnet permanen pada desain IPMSG 1 kW 18 slot 16 pole. Parameter awal studi material magnet permanen adalah memilah material magnet permanen dengan nilai BH_{max} yang sama dan H_c yang lebih tinggi. BH_{max} mengindikasikan produk energi maksimal yang dapat dicapai oleh generator, sedangkan H_c mengindikasikan performa *output* generator. Hasilnya, ada dua jenis material yang didapatkan, yakni magnet permanen dengan jenis N50H dan N50M (Eclipse Magnetic Ltd., 2021). Data spesifikasi material magnet permanen yang akan digunakan pada penelitian ini terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1: Spesifikasi magnet permanen IPMSG 1 kW 18 slot 16 pole

| Material | B_r | | H_c | | H_{ci} | | BH_{max} | |
|-------------|-------|--------|-------|------|----------|-----|-----------------|------|
| | T | G | kA/m | kOe | kA/m | kOe | kJ/m^3 | MGOe |
| NdFeb 48/11 | 1,375 | 13.750 | 820 | 10,3 | 875 | 11 | 380 | 48 |
| NdFeb N50H | 1,4 | 14.000 | 995 | 12,5 | 1,353 | 17 | 382 | 48 |
| NdFeb N50M | 1,4 | 14.000 | 1.035 | 13 | 1,114 | 14 | 382 | 48 |

Dari data yang terdapat pada Tabel 1, yang menjadi magnet permanen referensi atau sebagai magnet permanen pembanding adalah magnet permanen NdFeb 48/11. Magnet ini memiliki nilai B_r , H_c , dan H_{ci} yang lebih rendah dibandingkan dengan jenis NdFeb N50H dan NdFeb N50M. Perbedaan nilai ini yang nantinya akan diuji dan hasil performanya akan dianalisis. Selain itu, akan diketahui pula tingkat optimasi magnet permanen NdFeb N50H dan NdFeb N50M terhadap magnet permanen NdFeb 48/11.

Adapun spesifikasi desain dari *Interior Permanent Magnet Synchronous Generator* 1 kW 18 slot 16 pole dapat dilihat seperti yang terdapat pada Tabel 2.

Tabel 2: Sesifikasi desain IPMSG 1 kW 18 slot 16 pole

| Parameter | Nilai | Satuan |
|----------------------------|-------|--------|
| Jumlah slot | 18 | buah |
| Jumlah pole | 16 | buah |
| Diameter dalam stator (D) | 212 | mm |
| Diameter luar stator (Dos) | 280 | mm |
| Diameter rotor (Dr) | 210 | mm |
| Celah udara (Lg) | 1 | mm |
| Diameter poros | 50 | mm |
| Lebar gigi stator (Wts) | 16 | mm |
| Panjang inti efektif (Li) | 60 | mm |
| Tebal yoke stator (Ys) | 14 | mm |

| Parameter | Nilai | Satuan |
|--------------------------------|---|----------------|
| Panjang magnet | 60 | mm |
| Lebar magnet | 30 | mm |
| Ketebalan magnet | 5 | mm |
| Luas area medan magnet (Sm) | 0,00231 | m ² |
| Kecepatan (ns) | 375 | RPM |
| Tegangan | 230 | Volt |
| Daya | 1 | kW |
| Faktor daya | 0,85 | - |
| Frekuensi | 50 | Hertz |
| Tahanan beban | 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200 | Ω |
| Jumlah lilitan per <i>slot</i> | 119 | |
| Arah lilitan | Searah jarum jam | |
| Lokasi lilitan | Stator | |
| Tipe hubung | Hubungan <i>star</i> (bintang) | |
| Tipe lilitan | <i>Concentrated Winding</i> | |
| Konduktor lilitan | AWG 19 | |
| Material inti rotor dan stator | M250-50A | |
| Material konduktor lilitan | Copper: 5.77e7 Siemens/m | |

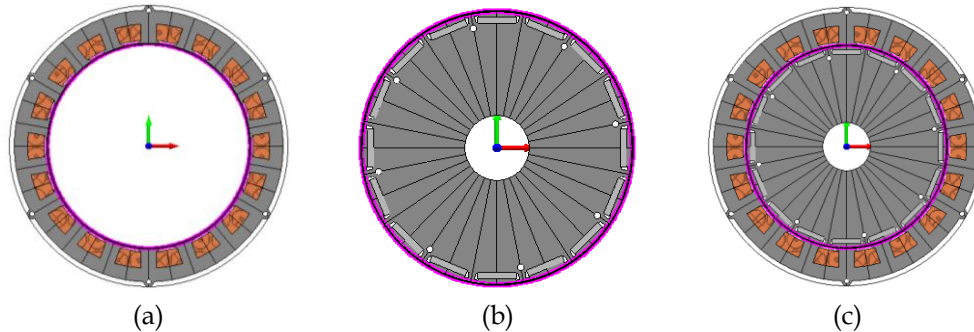
Untuk tegangan kerja berdasarkan rekomendasi PUIL 2011, batas bawah sebesar 5% dari tegangan nominal 220 volt dan batas atas sebesar 10%, sehingga tegangan kerjanya sebesar 209 sampai 242 volt.

Running simulasi diatur dari waktu 0 ms sampai 80 ms dengan step waktu sebesar 1,333 ms. Dengan konfigurasi ini maka akan didapatkan data sebanyak 60 data.. *Running* simulasi yang dipilih adalah '*Static 2D*' dan '*Transient 2D with Motion*', lalu aplikasi akan menjalankan simulasi desain generator sampai data hasil simulasi diperoleh (Infolytica Corporation, 2014).

Setelah *running* simulasi selesai, maka didapatkan data hasil simulasi. Data hasil simulasi akan digunakan dalam analisis penelitian, data tersebut berupa data torsi, tegangan, dan arus. Data torsi, tegangan, dan arus yang didapatkan berupa data dari waktu 0 ms sampai 80 ms. Untuk perhitungan daya *input* dibutuhkan nilai torsi RMS, maka diperlukan perhitungan untuk mencari nilai torsi RMS. Begitu juga dengan data tegangan dan arus yang perlu dilakukan perhitungan nilai tegangan RMS dan arus RMS.

Setelah didapatkan data hasil simulasi berupa nilai RMS, diperoleh daya *input*, daya *output* dan efisiensi. Penelitian ini menganalisis pengaruh material magnet permanen terhadap performa dari suatu generator IPMSG 1 kW 18 *slot* 16 *pole*. Performa yang dimaksud adalah daya *output* dan efisiensi pada setiap material magnet permanen. Variabel performa ini akan dianalisis seiring perubahan tahanan beban. Lalu pada akhirnya akan diketahui jenis material magnet permanen yang memiliki performa paling baik di antara ketiganya.

3. Hasil dan Pembahasan



Gambar 1: Desain IPMSG 1 kW 18 slot 16 pole (a) stator, (b) rotor, (c) utuh

Desain dari IPMSG 1 kW 18 slot 16 pole terdapat pada Gambar 1. Gambar 1 (a) merupakan desain bagian stator, Gambar 1 (b) merupakan bagian rotor, sedangkan Gambar 1 (c) merupakan bentuk utuhnya.

Dari data hasil simulasi yang telah didapat, maka dapat dibuat data performa setiap magnet permanen berupa daya *output* (P_{out}) dan efisiensi (η) yang diseleksi dengan batas arus maksimal 1,8 ampere. Batas arus 1,8 ampere merupakan kuat hantar arus untuk kawat konduktor lilitan yang menggunakan kabel 19 AWG berdiameter 0,91 mm².

3.1 Analisis Performa Magnet Permanen NdFeb 48/11

Tabel 3: Performa magnet permanen Ndfeb 48/11

| R (Ω) | V _{RMS} (V) | P _{in} (W) | P _{out} (Watt) | η (%) |
|----------------|----------------------|---------------------|-------------------------|------------|
| 100 | 164,17 | 828,77 | 687,26 | 82,93 |
| 120 | 165,10 | 700,56 | 579,23 | 82,68 |
| 140 | 167,00 | 606,28 | 507,97 | 83,79 |
| 160 | 168,29 | 534,18 | 451,38 | 84,50 |
| 180 | 169,22 | 477,31 | 405,67 | 84,99 |
| 200 | 169,92 | 431,33 | 368,13 | 85,35 |

Dari data yang terdapat pada Tabel 3, terdapat enam data pengujian yang berhasil diseleksi dengan batas arus maksimal 1,8 ampere. Dari data-data tersebut, dapat dianalisis bahwa performa terbaik dari material permanen NdFeb 48/11 terdapat pada beban 100 Ω dengan daya *output* sebesar 687,26 watt dan efisiensi 82,93 %. Namun dari semua data yang terdapat pada Tabel 3, nilai tegangan tidak ada yang masih di dalam batas tegangan kerja PLN. Nilai performa magnet permanen Ndfeb 48/11 merupakan nilai dasar awal atau nilai referensi yang nantinya berfungsi sebagai pembanding terhadap performa magnet permanen NdFeb N50H dan N50M.

3.2 Analisis Performa Magnet Permanen NdFeb N50H

Tabel 4: Performa magnet permanen NdFeb N50H

| R (Ω) | V _{RMS} (V) | P _{in} (W) | P _{out} (Watt) | η (%) |
|-------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------|---------------|
| 120 | 209,92 | 1.119,85 | 936,39 | 83,62 |
| 140 | 211,97 | 969,31 | 818,38 | 84,43 |
| 160 | 213,33 | 854,19 | 725,29 | 84,91 |
| 180 | 214,33 | 763,40 | 650,77 | 85,25 |
| 200 | 215,07 | 690,02 | 589,73 | 85,46 |

Dari data pada Tabel 4, terdapat lima data pengujian yang berhasil diseleksi dengan batas arus maksimal 1,8 ampere. Nilai tegangan pada kelima data pengujian masih dalam batas tegangan kerja PLN. Dari data-data tersebut, dapat dianalisis bahwa performa terbaik dari material permanen NdFeb N50H terdapat pada beban 120 Ω dengan daya *output* sebesar 936,39 watt dan efisiensi 83,62 %.

3.3 Analisis Performa Magnet Permanen NdFeb N50M

Tabel 5: Performa magnet permanen NdFeb N50M

| R (Ω) | V _{RMS} (V) | P _{in} (W) | P _{out} (Watt) | η (%) |
|-------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------|---------------|
| 120 | 219,55 | 1.222,50 | 1.007,73 | 82,43 |
| 140 | 221,65 | 1.058,03 | 894,82 | 84,57 |
| 160 | 223,04 | 932,23 | 792,83 | 85,05 |
| 180 | 224,01 | 833,01 | 710,87 | 85,34 |
| 200 | 224,71 | 752,82 | 643,79 | 85,52 |

Dari data yang terdapat pada Tabel 5, terdapat enam data daya *output* dan efisiensi yang berhasil disaring dengan batas arus maksimal 1,8 ampere. Nilai tegangan pada kelima data pengujian masih dalam batas tegangan kerja PLN. Dari data-data tersebut, dapat dianalisis bahwa performa terbaik dari material permanen NdFeb N50M terdapat pada beban 120 Ω dengan daya *output* sebesar 1.007,73 watt dan efisiensi 82,43 %.

3.4 Analisis Performa IPMSG 1 kW 18 Slot 16 Pole

Dengan menghimpun data-data nilai performa terbaik di setiap material magnet permanen yang terdapat pada Tabel 3, 4, dan 5, maka dapat diketahui performa terbaik IPMSG 1 kW 18 *slot* 16 *pole* berdasarkan ketiga jenis magnet permanen yang digunakan. Data-data tersebut dimuat ke dalam Tabel 6.

Tabel 6: Performa IPMSG 1 kW 18 slot 16 pole

| Nama Magnet Permanen | Daya Output (Watt) | Efisiensi (%) |
|----------------------|-----------------------|------------------|
| NdFeb 48/11 | 687,26 | 82,93 |
| NdFeb N50H | 936,39 | 83,62 |

| | | |
|------------|----------|-------|
| NdFeb N50M | 1.007,73 | 82,43 |
|------------|----------|-------|

Dari data yang terdapat pada Tabel 6, magnet permanen dengan performa terbaik pada penelitian ini adalah magnet permanen dengan jenis NdFeb N50M yang memiliki nilai daya *output* sebesar 1.007,73 watt dengan efisiensi 82,43 %, lalu diikuti oleh magnet NdFeb N50H dengan daya *output* 936,39 watt dan efisiensi 83,62 %.

3.5 Analisis Tingkat Optimasi IPMSG 1 kW 18 Slot 16 Pole

Setelah diketahui nilai performa daya *output* masing-masing magnet permanen, maka dapat dilakukan analisis tingkat optimasi IPMSG 1 kW 18 slot 16 pole. Tingkat optimasi mengindikasikan seberapa bagus perbaikan yang dicapai tiap magnet permanen terhadap magnet referensi. Pada penelitian ini, magnet permanen NdFeb 48/11 merupakan magnet permanen referensi, sedangkan magnet permanen NdFeb N50H dan NdFeb N50M merupakan magnet permanen yang akan dicari nilai tingkat optimasinya. Data hasil perhitungan tingkat optimasi magnet permanen terdapat pada Tabel 7.

Tabel 7: Tingkat Optimasi IPMSG 1 kW 18 slot 16 pole

| P_{out} 48/11 (W) | P_{out} N50H (W) | P_{out} N50M (W) | Optimasi N50H | Optimasi N50M |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|------------------|
| 579,23 | 936,39 | 1.007,73 | 61,66 | 73,98 |
| 507,97 | 818,38 | 894,82 | 61,11 | 76,16 |
| 451,38 | 725,29 | 792,83 | 60,68 | 75,65 |
| 405,67 | 650,77 | 710,87 | 60,42 | 75,23 |
| 368,13 | 589,73 | 643,79 | 60,20 | 74,88 |
| Rata-rata | | | 60,23 | 74,96 |

Dari data yang terdapat pada Tabel 7, maka dapat diketahui tingkat optimasi dari material magnet permanen NdFeb N50H sebesar 60,23 %, sedangkan pada material magnet permanen NdFeb N50M sebesar 74,96 %. Dapat ditarik kesimpulan magnet permanen dengan tingkat optimasi paling tinggi adalah magnet permanen NdFeb N50M.

4. Kesimpulan

Pada material NdFeb 48/11, terdapat enam hasil pengujian yang arusnya tidak melebihi arus maksimal konduktor AWG 19 serta tidak ada yang memenuhi batas tegangan kerja PLN (< 209 volt), sedangkan pada NdFeb N50H dan NdFeb N50M masing-masing sebanyak lima hasil pengujian serta memenuhi batas tegangan kerja PLN (209 s/d 242 volt). Performa daya *output* terbaik dari NdFeb48/11 sebesar 687,26 watt dan efisiensi 82,93 %, pada NdFeb N50H sebesar 936,39 watt dan efisiensi 83,62 % dengan beban minimal 120 Ω , sedangkan pada NdFeb N50M sebesar 1.007,73 watt dan efisiensi 82,43 % dengan beban minimal 120 Ω .

Tingkat optimasi material magnet permanen NdFeb N50H sebesar 60,23 %, sedangkan pada Ndfieb N50m sebesar 74,96 %.

5. Referensi

- Andika, et al. (2023). Analisis Pengaruh Slot Terhadap Efisiensi Generator Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG) 12 Slot 16 Pole dan 24 Slot 16 Pole Menggunakan FEM (Finite Element Method). *Jurnal Al-Azhar Indonesia Seri Sains Dan Teknologi*, 8(3), 213–223. <https://doi.org/10.36722/sst.v8i3.1705>
- Eclipse Magnetic Ltd. (2021). *Technical Data Sheet Neodymium Iron Boron Magnets*.
- Edwards, J. D. (2014). *An introduction to MagNet for Static 2D Modeling*.
- EL-Refaie, A. M. (2010). Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(1), 107–121. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2030211>
- Infolytica Corporation. (2014). *Magnetostatic / Time Harmonic / Transient / Transient with Motion 2D & 3D Tutorials*. Infolytica Corporation.
- Miller, T. J. E. (1989). *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*. Oxford University Press.
- Niu, L. (2025). Optimization design and torque performance research of interior permanent magnet synchronous motors. In *Scientific Reports* (Vol. 15, Nomor 1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93285-x>
- Pambudi, et al. (2025). The Future of Wind Power Plants in Indonesia: Potential, Challenges, and Policies. *Sustainability (Switzerland)*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/su17031312>
- PT PLN (Persero). (2023). Statistik PLN 2022. In *Statistik PLN*. Sekretariat Perusahaan PT PLN (Persero).
- Sumawang, et al. (2022). Analisis Perubahan Jumlah Slot pada Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) untuk Mencapai Nilai Optimal Back EMF dan KE Berbasis Finite Element Method (FEM). *TEKNIK*, 43(2), 140–146. <https://doi.org/10.14710/teknik.v43i2.44519>
- Wang, et al. (2019). Multi-Objective Optimization of Less-Rare-Earth Interior Permanent Magnet Synchronous Machines Used for Electric Vehicles. *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2019.8921444>